



Universidad
Carlos III de Madrid

SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS DE POTENCIA DE UNA POBLACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS MEDIANTE EL MÉTODO MONTE CARLO EN UN SISTEMA V2G

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Ana Odile Gadea Capiscol

TUTOR:

Javier Sanz Feito

ÍNDICE

RESUMEN	8
ABSTRACT	10
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 CONTEXTO Y MOTIVACIÓN	12
1.2 ANTECEDENTES	16
1.3 OBJETIVOS	18
1.4 ALCANCE DEL TRABAJO	19
1.5 ESTRUCTURA	20
1.6 HIPÓTESIS GENERALES	21
CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA Y ESTADO DEL ARTE	23
2.1 EL VEHÍCULO ELÉCTRICO	24
2.1.1 INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO HISTÓRICO	25
2.1.2 ARQUITECTURA, TIPOLOGÍA Y MODELOS DE VE	27
2.1.2.1 VEHÍCULOS HÍBRIDOS ELÉCTRICOS	27
2.1.2.2 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS PUROS	28
2.1.2.3 ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS SEGÚN TIPOLOGÍA DE VE	29
2.1.3 COMPONENTES DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO	31
2.1.4 ESTADO DEL ARTE DE LAS BATERÍAS	32
2.1.5 LA RECARGA DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	33
2.2 LA MOVILIDAD URBANA	37
EL ESTADO DEL ARTE DE LA MOVILIDAD URBANA	39
2.3 EL CONSUMO ENERGÉTICO Y LA DEMANDA ELÉCTRICA	41
2.3.1 ESTADO DEL ARTE DE LA DEMANDA ELÉCTRICA Y LOS MODELOS DE DEMANDA	44
2.3.1.1 MÉTODOS ESTADÍSTICOS	44
2.3.1.2 REDES NEURONALES	45
2.3.1.3 DEMANDA ASOCIADA A LA TECNOLOGÍA DE VE	45
2.3.2 EL SECTOR ELÉCTRICO	46
2.3.3 INTEGRACIÓN DEL VE	48
2.3.3.1 INFLUENCIA DE LAS ESTRATEGIAS DE CARGA EN EL IMPACTO DEL VE	49
2.3.3.2 EL VE COMO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DISTRIBUIDO	51
CAPÍTULO 3. MODELO ESTOCÁSTICO DE SIMULACIÓN DE LA DEMANDA DE UNA POBLACIÓN DE VE	53
3.1 METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DEL MODELO DE DEMANDA	54

3.2	DESARROLLO DEL MODELO DE DEMANDA.....	56
3.3	DEFINICIÓN DE LA COMUNIDAD OBJETO DE ESTUDIO. DATOS DE ENTRADA Y CÁLCULOS PREVIOS.....	63
3.3.1	DATOS DE MOVILIDAD.....	64
3.3.1.1	NÚMERO DE DESPLAZAMIENTOS MEDIO POR PERSONA Y DÍA	64
3.3.1.2	DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LOS DESPLAZAMIENTOS	65
3.3.1.3	DURACIÓN, VELOCIDAD Y LONGITUD MEDIAS DE DESPLAZAMIENTO	66
3.3.2	DATOS DE VEHÍCULO ELÉCTRICO.....	67
3.3.3	DATOS DE CARGA Y TARIFA ELÉCTRICA	67
3.4	SIMULACIÓN DEL MODELO ELABORADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE UNA COMUNIDAD DE VE.....	69
3.4.1	USUARIOS PRIVADOS DE TIPO PERSONAL.....	69
3.4.1.1	MATRIZ DE MOVILIDAD	70
3.4.1.2	MATRIZ DE CONSUMOS.....	72
3.4.1.3	MATRIZ DE CARGAS	73
3.4.1.4	CONCLUSIÓN.....	78
3.4.2	USUARIOS PRIVADOS DE TIPO PROFESIONAL	80
3.4.2.1	MATRIZ DE MOVILIDAD PROFESIONAL.....	81
3.4.2.2	MATRIZ DE CONSUMOS PROFESIONAL	83
3.4.2.3	MATRIZ DE CARGAS PROFESIONAL.....	84
3.4.2.4	CONCLUSIÓN.....	85
3.4.3	TOTALIZACIÓN DE RESULTADOS.....	86
 CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN UNA COMUNIDAD DE PRUEBA.		
ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....		88
4.1	DATOS DE ENTRADA Y CÁLCULOS PREVIOS.....	89
4.1.1	CARACTERIZACIÓN DEL PERFIL DE MOVILIDAD.....	89
4.1.1.1	NÚMERO DE DESPLAZAMIENTOS MEDIO POR PERSONA Y DÍA	90
4.1.1.2	DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LOS DESPLAZAMIENTOS	91
4.1.1.3	DURACIÓN, VELOCIDAD Y LONGITUD MEDIAS DE DESPLAZAMIENTO	93
4.1.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS DE VE	97
4.1.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS MODOS DE CARGA Y LA TARIFA ELÉCTRICA.....	98
4.1.3.1	MODOS DE CARGA.....	99
4.1.3.2	TARIFAS ELÉCTRICAS	100
4.2	RESULTADOS OBTENIDOS TRAS LA SIMULACIÓN.....	101
4.2.1	PERFIL DE MOVILIDAD SIMULADO	102
4.2.1.1	NÚMERO DE DESPLAZAMIENTOS MEDIO POR PERSONA Y DÍA	102
4.2.1.2	DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LOS DESPLAZAMIENTOS	103
4.2.1.3	DURACIÓN, VELOCIDAD Y LONGITUD MEDIAS DE DESPLAZAMIENTO	104
4.2.2	COMPARATIVA RESULTADOS CON DATOS REALES	106
4.2.2.1	NÚMERO DE DESPLAZAMIENTOS MEDIO POR PERSONA Y DÍA	107
4.2.2.2	DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LOS DESPLAZAMIENTOS	108
4.2.2.3	DURACIÓN, VELOCIDAD Y LONGITUD MEDIAS DE DESPLAZAMIENTO	109
4.2.2.4	CONCLUSIÓN DE LA COMPARATIVA	111
4.2.3	DEMANDA ELÉCTRICA ASOCIADA A LA COMUNIDAD SIMULADA Y CONSUMO ESTIMADO	

4.2.4	COSTE ASOCIADO A MOVILIDAD CON VEHÍCULO ELÉCTRICO	115
4.3	COMPARATIVA DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE CARGA	117
4.3.1	DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRATEGÍAS CONSIDERADAS	118
4.3.1.1	CASO 1: CARGA CONTROLADA ESTÁNDAR	118
4.3.1.2	CASO 2: CARGA SIN CONTROL	119
4.3.1.3	CASO 3: CARGA CONTROLADA Y LIMITADA.....	121
4.3.2	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CURVAS DE DEMANDA EN FUNCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CARGA SEGUIDA	123
CONCLUSIONES		131
1.	ANÁLISIS DE OBJETIVOS Y CONCLUSIONES GENERALES	131
2.	ANÁLISIS DE POSIBLES MEJORAS AL MODELO ELABORADO Y TRABAJOS FUTUROS.	133
PRESUPUESTO		135
ANEXO I. CÁLCULOS PREVIOS Y TABLAS DE VARIABLES USADAS		136
ANEXO II. TABLAS DE MODELOS DE VE.....		143
ANEXO III. CURVAS DE DEMANDA DE LAS DIFERENTES ESTRATEGÍAS DE CARGA....		147
ANEXO IV. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN VE		157
1.	EL MOTOR ELÉCTRICO.....	157
2.	LA BATERÍA	161
	OTRAS ALTERNATIVAS DE ALMACENAMIENTO ELÉCTRICO	165
ANEXO V. EL SECTOR ELECTRICO Y LA ENERGÍA ELÉCTRICA		167
1.	EL SECTOR ELÉCTRICO	167
1.1	LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD	168
1.2	LAS REDES ELÉCTRICAS	168
2.	ESTADO DEL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL.....	172
	INFRAESTRUCTURAS	176
AGRADECIMIENTOS.....		178
BIBLIOGRAFÍA		179

ÍNDICE DE FIGURAS

Imagen 1. "Jamais Contente", Camille Jenatzy. 1899	25
Imagen 2. Evolución histórica del Vehículo Eléctrico, VE. ENDESA [22]	26
Imagen 3. Tipología de Vehículos Eléctricos.	29
Imagen 4. Comparativa ventas anuales previstas de vehículo ligeros y ventas anuales de VE (BEH Y PHEV). Escenario Blue Map 2000-2050 [34].....	49
Imagen 5. Recarga Inteligente. Red Eléctrica de España (REE) [75].....	51
Imagen 6. Estructura general del programa creado y variables dato de entrada necesarias. ...	57
Imagen 7. Diagrama de flujo del funcionamiento del programa.	60
Imagen 8. Distribución de Poisson para la generación del número de desplazamientos por día que realiza cada usuario de VE de la comunidad objeto de estudio.	62
Imagen 9. Distribución exponencial, para la generación de la longitud de cada desplazamiento realizado por cada usuario de tipo privado personal de la comunidad objeto de estudio.	71
Imagen 10. Estrategia de carga seguida por los usuarios de la comunidad objeto de estudio, independientemente del tipo de usuario.	76
Imagen 11. Registro de datos en cada parada en la que se realiza una carga en modo lento. Código fuente.....	77
Imagen 12. Registro de datos en cada parada en la que se realiza una carga en modo rápido. Código fuente.....	77
Imagen 13. Registro de datos en cada parada en la que se realizada una carga. Código fuente.	78
Imagen 14. Ejemplo de matriz multidimensional, del tipo de las matrices Movilidad, Consumos y Cargas usadas en el programa elaborado. Matlab [70].	79
Imagen 15. Estructura de la matriz Movilidad. Registra el perfil de movilidad de cada usuario participante en la comunidad objeto de estudio.	79
Imagen 16. Estructura de la matriz Consumos. Registra las necesidades de consumos de cada usuario de participante en la comunidad objeto de estudio.	80
Imagen 17. Estructura de la matriz Cargas. Registra la estrategia de carga seguida por cada usuario participante en la comunidad objeto de estudio.	80
Imagen 18. Distribución exponencial, para la generación de la longitud de cada desplazamiento realizado por cada usuario de tipo privado profesional de la comunidad objeto de estudio.	82
Imagen 19. Estructura de la matriz MovilidadP. Registra e perfil de movilidad de todos los usuarios de tipo profesional participantes en la comunidad objeto de estudio.	85
Imagen 20. Estructura de la matriz ConsumosP. Registra las necesidades de consumo de todos los usuarios de tipo profesional participantes en la comunidad objeto de estudio.	85
Imagen 21. Estructura de la matriz CargasP. Registra la estrategia de carga de todos los usuarios de tipo profesional participantes en la comunidad objeto de estudio.	86
Imagen 22. Cálculo del coste asociado a cada parada realizada por cada usuario participante en la comunidad objeto de estudio. Código fuente.....	87
Imagen 23. Distribución horaria de los desplazamientos en función del tipo de usuario (izquierda) y del motivo del desplazamiento (derecha). Datos reales [42].	92
Imagen 24. Probabilidad horaria de desplazamiento (izquierda) y probabilidad acumulada (derecha) en función del tipo de usuario y del motivo del desplazamiento. Datos reales [42].	93

Imagen 25. Distribución horaria de los desplazamientos en función del tipo de usuario (izquierda) y del motivo del desplazamiento (derecha) para la comunidad simulada. Resultado de simulación.	104
Imagen 26. Distribución horaria de desplazamientos en función del tipo de usuario (izquierda) y del motivo del desplazamiento (derecha). Comparativa datos reales y resultados de simulación.	109
Imagen 27. Curva de demanda horaria en función del tipo de usuarios para la comunidad simulada. Resultado de simulación.	112
Imagen 28. Curva de demanda horaria en función del tipo de usuario (izquierda) y del motivo del desplazamiento (derecha) para la comunidad simulada. Resultados de simulación.	113
Imagen 29. Curva de demanda horaria para el conjunto total de usuarios participantes en la comunidad simulada. Resultados de simulación.	114
Imagen 30. Estrategia de carga con control, caso 1. Esquema de actuación.	119
Imagen 31. Estrategia de carga sin control, caso 2. Esquema de actuación.	121
Imagen 32. Estrategia de carga con control y limitación de carga, caso 3. Esquema de actuación.	123
Imagen 33. Curva de demanda horaria en función del tipo de usuario para el caso 1. Resultados de simulación.	128
Imagen 34. Curva de demanda horaria en función del tipo de usuario para el caso 2. Resultados de simulación.	128
Imagen 35. Curva de demanda horaria en función del tipo de usuario para el caso 3. Resultados de simulación.	128
Imagen 36. Curva de demanda horaria en función del modo de carga para el caso 1. Resultados de simulación.	129
Imagen 37. Curva de demanda horaria en función del modo de carga para el caso 2. Resultados de simulación.	129
Imagen 38. Curva de demanda horaria en función del modo de carga para el caso 3. Resultados de simulación.	129
Imagen 39. Curva de demanda horaria total para el caso 1. Resultados de simulación.	130
Imagen 40. Curva de demanda horaria total para el caso 2. Resultados de simulación.	130
Imagen 41. Curva de demanda horaria total para el caso 3. Resultados de simulación.	130
Imagen 42. Curva de funcionamiento ideal de un motor eléctrico (izquierda) y curva de funcionamiento de un motor de combustión con caja de cambios. [3].	158
Imagen 43. Tipos de motores eléctricos presentes en el mercado actual y su aplicación.	160
Imagen 44. Energía específica [Wh/kg] frente a potencia específica [W/kg] para diferentes tecnologías de batería. Technology Roadmap. IEA [34].	164
Imagen 45. Centrales de generación de energía eléctrica.	169
Imagen 46. Curva de demanda horaria para un día de entre semana. Red Eléctrica de España (REE) [75].	171
Imagen 47. Cobertura de la demanda anual de energía eléctrica en el año 2014.	174
Imagen 48. Curva de carga del día 04 de febrero de 2014, en el cual se registró un record de demanda máxima horaria (izquierda) y la cobertura de la citada demanda máxima horaria, de 38.666MW (derecha). Datos aportados por Red Eléctrica de España (REE) [75].	174
Imagen 49. Cobertura de la demanda de energía eléctrica anual.	175
Imagen 50. Características que engloba una Smart Grid.	177

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa eficiencias VCI gasolina y diésel y VE. Análisis Well-to-Tank, Tank-to-Wheel y Well-to-Wheel.....	42
Tabla 2. Comparativa consumos VCI gasolina y diésel y VE.....	42
Tabla 3. Características de la tarifa eléctrica con discriminación horaria.....	87
Tabla 4. Número de desplazamientos medio por usuario. Clasificación de los dos conjuntos de usuarios considerados.....	91
Tabla 5. Duración, velocidad y longitud media de desplazamiento. Datos reales.....	95
Tabla 6. Duración y longitud media de desplazamiento en función del tipo de desplazamiento, para usuarios privado personal. Datos reales.....	96
Tabla 7. Duración y longitud media de desplazamiento en función del tipo de desplazamiento, para usuarios privado profesional. Datos reales.....	96
Tabla 8. Catálogo de modelos de VE para usuarios privados personales considerados en el programa elaborado para la comunidad objeto de estudio. Datos reales [15].....	97
Tabla 9. Catálogo de modelos de VE para usuarios privados profesionales considerados en el programa elaborado para la comunidad objeto de estudio. Datos reales [15].....	98
Tabla 10. Tensión, intensidad y perdidas propios de los puestos de recarga, en función del modo de carga, de la comunidad objeto de estudio. Datos reales.	99
Tabla 11. Tarifa eléctrica sin discriminación horaria para la comunidad objeto de estudio. Datos reales.....	101
Tabla 12. Tarifa eléctrica con discriminación horaria para la comunidad objeto de estudio. Datos reales.....	101
Tabla 13. Número medio de desplazamiento por usuario y día para la comunidad simulada. Resultado de simulación.	103
Tabla 14. Longitud y duración media total y longitud y duración media por desplazamiento para usuarios privados personales para la comunidad simulada. Resultados de simulación. .	105
Tabla 15. Longitud y duración media total y longitud y duración media por desplazamiento para usuarios privados personales para la comunidad simulada. Resultados de simulación. .	106
Tabla 16. Número de desplazamiento por usuario y día y porcentaje de participación para usuarios privados personales. Comparativa de datos reales y resultados de simulación.	107
Tabla 17. Número de desplazamiento por usuario y día y porcentaje de participación para usuarios privados profesionales. Comparativa de datos reales y resultados de simulación....	107
Tabla 18. Longitud y duración media por desplazamiento para usuarios privados personales. Comparativa datos reales y resultados de simulación.....	110
Tabla 19. Longitud y duración media por desplazamiento para usuarios privados profesionales. Comparativa datos reales y resultados de simulación.....	110
Tabla 20. Consumo eléctrico medio por usuario en función del tipo de usuario y consumo eléctrico total según el modo de carga para la comunidad simulada. Resultados de simulación.	115
Tabla 21. Presupuesto medio de movilidad con tecnología de VE para un usuario por día o por kilómetro recorrido, con y sin IVA, para la comunidad simulada. Resultado de simulación. (*)Calculado usando el valor de longitud media total para un día de movilidad según tipo de usuario para la comunidad simulada, indicado en Tabla 14 y Tabla 15.....	116

Tabla 22. Presupuesto de movilidad con tecnología de VCI por km recorrido con un gasolina y con un diésel, IVA incluido. Para un precio de la gasolina de 1.35€/l y del diésel de 1.20€/l y un consumo del VCI de 6l/100km.	116
Tabla 23. Número medio de desplazamientos por usuario de tipo privado personal y día para la comunidad simulada, en función de la estrategia de carga aplicada. Resultado de simulación.	126
Tabla 24. Número medio de desplazamientos por usuario de tipo privado profesional y día para la comunidad simulada, en función de la estrategia de carga aplicada. Resultado de simulación.	126
Tabla 25. Longitudes y duraciones medias por desplazamiento para usuarios privados personales de la comunidad simulada, en función de la estrategia de carga aplicada. Resultados de simulación.....	126
Tabla 26. Longitudes y duraciones medias por desplazamiento para usuarios privados profesionales de la comunidad simulada, en función de la estrategia de carga aplicada. Resultados de simulación.....	127
Tabla 27. Consumos eléctricos medios por usuario según tipo de usuario y consumos eléctricos totales según modo de carga, para la comunidad simulada en función de la estrategia de carga aplicada. Resultados de simulación.	127
Tabla 28. Comparativa de los distintos motores eléctricos en función de los requisitos que han de cumplir para su aplicación en la tracción de VE.....	159
Tabla 29. Comparativa entre tecnologías de batería actualmente más usadas en función de los requisitos para su aplicación a la tecnología de VE.	164
Tabla 30. Evolución de la demanda eléctrica entre los años 2010 y 2014. Datos aportados por Red Eléctrica de España (REE) [75]. (*)Por los efectos de la laboralidad y la temperatura.....	173
Tabla 31. Evolución del sistema de transporte y transformación. Datos aportados por Red Eléctrica de España (REE) [75]......	176

RESUMEN

La sociedad actual se enfrenta a grandes desafíos económicos, ecológicos, sociales y políticos para lograr un funcionamiento armónico a lo largo del tiempo, es decir, que le permita satisfacer las necesidades de la generación actual sin comprometer con ello la capacidad de futuras generaciones de satisfacer las suyas propias [1]. Los niveles de contaminación y riesgos ambientales y la situación de crisis económica que atraviesa nuestra sociedad hoy en día, hace pensar que se trata del momento idóneo para impulsar un cambio en la mentalidad y comportamiento de la sociedad en su conjunto. Tecnología, energía y comunicación son tres factores esenciales que han de ir de la mano para el desarrollo de sociedades más sostenibles. Sin el uso responsable de la tecnología y la energía no será posible lograr el crecimiento económico y la equidad global. Por su parte, sin una serie de habilidades de comunicación no se logrará la eficiencia necesaria para alcanzar ese objetivo.

Uno de los pasos necesarios para lograr una sociedad sostenible se centra en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente del CO₂. Como reto fundamental para su logro está el desarrollo de los sectores energético y de transporte. Teniendo en cuenta que el 80% de tales emisiones son generadas en las ciudades y en especial por el sector del transporte, el propio progreso nos encamina al desarrollo e implementación de medios de transporte alternativos a los vehículos de combustión interna (VCI). Es aquí donde entra con fuerza el vehículo eléctrico (VE), que cuentan con emisiones cero durante su movilidad. En cuanto al sector energético, el desarrollo en materia de energías renovables (ER) nos permite obtener la energía final¹ más usada, la electricidad, libre de emisiones pudiendo así reducir aún más los niveles de contaminación en su asociación con el VE. Pero a su vez, el avance masivo en materia de ER así como de la tecnología de VE y su introducción en las ciudades requieren de una adaptación de las redes actuales para hacerlas más flexibles, debido a la elevada variabilidad tanto de las condiciones climatológicas como de las necesidades de movilidad de los usuarios. Si bien la integración de ER en los sistemas eléctricos es ya una realidad prácticamente a nivel mundial, el tema del VE genera una mayor incertidumbre haciendo necesaria la realización de diversos estudios que permitan pronosticar la demanda eléctrica asociada a los mismos, ya que

¹ Se entiende por energía final a la que se obtiene a partir de las primarias mediante el conveniente proceso de transformación químico o físico. No es lo mismo que la energía útil, que es aquella directamente aprovechable. El consumidor compra energía final y obtiene energía útil.

la carga adicional que estos suponen puede comprometer la estabilidad del sistema eléctrico actual.

En este contexto, el presente proyecto se ha realizado con el objetivo de estudiar la viabilidad de la inserción del VE en la vida cotidiana, para lo cual se ha desarrollado un método estocástico de simulación de demanda eléctrica asociada a una población de VE, para poder analizar su impacto en las redes eléctricas y la capacidad de asimilación que estas presentan ante esta carga adicional. Se comienza con un análisis del estado del arte de los tres aspectos clave en la determinación de la demanda asociada a una comunidad de VE: el vehículo eléctrico, la movilidad urbana y el sector eléctrico. A continuación, se pasa a desarrollar el modelo de simulación atendiendo a diferentes estrategias de carga consideradas. Con objeto de obtener datos que puedan ser interpretados y analizados y de los cuales extraer ciertas conclusiones, se aplica el modelo a unos valores particulares de comunidad, recogidos de diferentes bases de datos estadísticos a nivel nacional. Aun así cabe dejar claro que el objetivo de este proyecto es la obtención de un modelo genérico que pueda ser adaptado a diferentes casos de estudio. Con los resultados extraídos de la simulación, se elaboran curvas de demanda eléctrica, estimaciones de consumos y un presupuesto del coste asociado a la movilidad con VE. Seguidamente se presenta un análisis del impacto que tiene en el reparto de la demanda a lo largo del tiempo de simulación, la asociación de diferentes estrategias de carga a los usuarios participantes. Se finaliza el trabajo con una exposición de conclusiones y mejoras y trabajos futuros que se pueden llevar a cabo.

En definitiva, el vehículo eléctrico supone una gran oportunidad para reducir las emisiones de CO₂ y los niveles de ruido, principalmente en entornos urbanos, para disminuir nuestra dependencia energética del exterior y mejorar la eficiencia global del sistema eléctrico. Pero para poder aprovechar esa oportunidad se han de elaborar estudios de comportamiento como carga adicional en las redes de distribución de este nuevo tipo de movilidad, como el aquí propuesto, de manera que se pueda llevar a cabo una gestión de este nuevo agente del sistema eléctrico.

ABSTRACT

The current society faces big economic, ecological, social and political challenges to achieve a harmonic functioning throughout the time, that is to say, that allows it to satisfy the needs of the current generation without compromising the capacity of future generations to satisfy own theirs [1]. The levels of pollution and environmental risks and the situation of economic crisis that crosses our society nowadays, suggest that it is the right time to stimulate a change in the mentality and behaviour of the whole society. Technology, energy and communication are three essential factors that must go hand in hand for the development of more sustainable communities. Without the responsible use of the technology and the energy it will not be possible to achieve the economic growth and the global equity. Meanwhile, without some communication skills the necessary efficiency to reach this aim will not be achieved.

One of the necessary steps towards a more sustainable society focuses on the reduction of greenhouse gas emissions (GHGs), especially CO₂ ones. As a fundamental challenge to its achievement is the development of transport and energy sectors. Bearing in mind that 80 % of these emissions are generated in the cities and especially for the transport sector, the progress by itself leads us to the development and implementation of alternative means of transport to the internal combustion vehicles (ICV). It is here where hard tackles the electric vehicle (EV), which have zero emissions during its mobility. Regarding the energy sector , development in renewable energy (RE) allows us to obtain the final most used energy, electricity, emissions-free being able to reduce furthermore the pollution levels linking RE to EV. But in turn, the massive advance in RE as well as EV technology and its introduction in cities require an adaptation of existing networks to make them more flexible, due to the high variability of both weather conditions and the users' mobility needs. Though the RE's integration in power systems is already a reality almost worldwide, the topic of EV generates a major uncertainty making necessary the accomplishment of diverse studies that allow us to predict the electrical demand associated with them.

In this context, this project has been realized by the aim to study the viability of the insertion of the EVs in the daily life, for which has developed a stochastic simulation method of electrical demand associated with a population of EVs to analyse its impact on power grids and the assimilative capacity of this additional load by the networks. For it, it is begun with an analysis of the state of the art of the three main aspects in determining demand associated with a

community of VE: electric vehicles, urban mobility and the electricity sector. Then it goes on to develop of the simulation model according to different loading strategies considered. In order to obtain information that could be interpreted and analyzed and from which to draw certain conclusions, the model is applied to particular community values, collected from different databases nationwide. Even this way it is necessary to clarify that the aim of this project is to obtain a generic model that could be adapted to different cases of study. With the results taken from the simulation have been elaborated curves of electrical demand, estimations of consumptions and a budget of the cost associated with the mobility with EV. Below is presented an analysis of the impact of the association of different loading strategies to the participant users in the distribution of demand throughout the simulation time. The work concludes with an exhibition of conclusions and improvements and future works that can be carried out.

Definitively, the electrical vehicle supposes a great opportunity to reduce the CO₂ emissions and the noise levels, mainly in urban areas, to reduce our dependence on foreign energy and to improve the global efficiency of the electricity system. But to be able to take advantage of this opportunity there have to be elaborated studies of behavior of this new type of mobility, as proposed here, so that it could carry out a management of this new agent of the electrical system.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO Y MOTIVACIÓN

Las sociedades modernas dependen cada vez más de los suministros fiables y seguros de energía para el crecimiento económico y para la prosperidad de la comunidad [2]. Al mismo tiempo estas sociedades se enfrenta a serios problemas medioambientales, el cambio climático ha pasado de amenaza a realidad siendo por ello prioritario la reducción de las emisiones de los GEI que lo causan. Así pues es desafío clave para los países de todo el mundo la descarbonización rápida de los sistemas de energía a la vez que se garantiza el mantenimiento de los suministros de energía fiables y seguros. Las emisiones de CO₂, especialmente las relativas a los sectores energético y de transporte, conforman la mayor parte de las emisiones de GEI globales. La lucha contra el cambio climático se ha convertido en una característica determinante en las decisiones políticas en materia de energía a nivel mundial. En este sentido y a modo de ejemplo se tienen el Protocolo de Kyoto o la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Aun así a día de hoy esto no es suficiente, por ejemplo el cumplimiento de los objetivos de emisiones prometidos por los países participantes en la CMNUCC seguirá dejando al mundo con 13,7 millones de toneladas de CO₂ (un 60%) por encima del nivel necesario para mantener el objetivo de limitar el posible calentamiento medio del planeta a 2°C, límite de temperatura a partir del cual el cambio climático se volvería irreversible para el año 2035 [2]. Para lograr esta última cuestión, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático de Naciones Unidas (IPCC) afirma que se deberían reducir las emisiones globales de CO₂ en al menos un 50% respecto a niveles de 2005. Este objetivo pasa por reducir en un 23% las emisiones globales relacionadas con el transporte , según el Escenario Blue Map desarrollado por la Agencia Internacional de la Energía en su publicación Energy Technologies Perspectives 2010 [3].

Por su parte la Unión Europea, siempre comprometida con los esfuerzos internacionales para combatir el cambio climático, ha querido dar ejemplo mediante una sólida formulación de políticas dentro de ella. A nivel europeo un paquete global de medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero se ha iniciado a través del Programa Europeo sobre el Cambio Climático (PECC). Actualmente la Comisión Europea se encuentra elaborando la hoja de ruta Energía 2050 precisamente con la descarbonización como objetivo [4].

Viendo que no se alcanza la reducción necesaria de emisiones es claro que debemos introducir más cambios, y en este contexto se plantea el interrogante de qué es necesario para lograrlo. Pues bien, existen dos vías fundamentales para la reducción de tales emisiones. La primera consiste en la reducción de las mismas del lado de la oferta, por ejemplo, incentivando la generación de electricidad a partir de energías renovables en sustitución de los combustibles fósiles (actualmente el 80% de la energía generada proviene de estos) y mediante la captura y almacenamiento del carbono. La segunda viene del lado de la demanda y consiste en la concienciación de la sociedad en materia de eficiencia energética y en cambios en los hábitos de transporte, apostando fundamentalmente por la integración del VE. Siguiendo esto, este trabajo se centra en la realización de un estudio para implantación del VE en la actual sociedad, sin dejar de lado las ER al defenderse el enfoque del VE, no solo como medio de transporte sustituto de los vehículos de combustión, sino además como un apoyo al desarrollo en materia de ER, sirviendo como fuente de almacenamiento y suministro de electricidad por medio de sus baterías en momentos en los que así las redes los requieran, dentro del concepto de sistema V2G (Vehicle-to-Grid). Se desarrollará más el tema en capítulos posteriores.

Si bien es cierto que a través de una serie de políticas de incentivación se ha conseguido que las ER pasen a formar parte importante del mix energético, no se ha logrado un cambio en el sector del transporte. En España, por ejemplo, este sector consume un 41% de la demanda energética de uso final y sigue siendo la asignatura pendiente en cuanto a descarbonización si se quieren cumplir los objetivos comprometidos con la UE para el año 2020 [5], es decir, lograr una reducción de 20% en las emisiones de GEI para el citado año con respecto a los niveles del año 1990. Dentro de ese mismo compromiso se encuentran los objetivos de reducción del 20% del consumo energético total, apostando por la eficiencia energética, y el suministro de un 20% de la energía de uso final mediante fuente de origen renovable. Como se expondrá más adelante en esta memoria, el VE supone una gran oportunidad en estos tres ámbitos ayudando a la mejora de la eficiencia global del sistema eléctrico y disminuyendo la dependencia energética del exterior, contribuyendo en gran medida a la reducción de las emisiones de CO₂ y a la integración de las ER en la generación de energía eléctrica.

El sector del transporte genera alrededor de un cuarto de las emisiones globales de CO₂ y se prevé que aumente en un 1,7% anual en el periodo entre 2004 y 2034. Esto viene motivado por la previsión de crecimiento del transporte por carretera para 2030, en gran medida debido al aumento de la movilidad en países en vías de desarrollo, en los que los índices de crecimiento

se prevé que rondan el promedio del 2,8%. Si a esto le sumamos la rápida urbanización a nivel mundial y más en concreto en estos países, las emisiones relacionadas con el transporte en áreas urbanas son candidatas a sufrir una considerable elevación. Conforme al presente acuerdo internacional sobre cambio climático, los incentivos para crear redes de transporte sostenibles en los distintos países son débiles. El transporte sostenible es uno de los desafíos más urgentes en relación al cambio climático y aun así actualmente tan solo juega papeles menores en las negociaciones y los acuerdos internacionales en este sentido. Hay signos que indican que esta actitud se está revirtiendo y es por ello el momento ideal de aportar nuevos estudios en este campo, que faciliten un cambio de mentalidad y fomenten los apoyos necesarios para la evolución de este sector hacia algo más sostenible y ecológico.

Si al tema de emisiones se le suma la incertidumbre acerca del futuro de los combustibles fósiles y las fluctuaciones de este mercado así como el hecho de depender de unos pocos países, parece indiscutible la necesidad de trabajar para transformar el actual sistema de transporte y hacerlo más respetuoso con el medio ambiente y más acorde a la sociedad del futuro. Un sistema que además de no agotar los recursos naturales ni dañar la salud de los humanos, facilite la integración de las ER en el sistema eléctrico poniendo su grano de arena a problemas como el almacenamiento de electricidad, que conduce a vertidos energéticos en ciertos momentos en los que generación supera a demanda, y permitiendo una mejor gestión energética, lo cual actualmente es un punto de dificultad debido a la variabilidad de las ER. En este sentido es en el que el VE se enmarca como una potente elección. Con él se brinda la posibilidad de manejar la energía según interese, usando sus baterías como almacenamiento en momentos de exceso de generación o como surtidor en momentos de defecto. Además supone un medio de transporte limpio y silencioso logrando saciar el anhelo de todo entorno urbano, aportando a sus habitantes una mayor calidad del aire y una tranquilidad acústica que mejore su calidad de vida.

ELECTRIFICACIÓN DEL TRANSPORTE

Como resultado a la valoración del contexto energético, económico y social actual, surge la motivación de este trabajo de contribuir a una electrificación del sistema de transporte. A lo largo de los últimos años, la industria automovilística ha llevado a cabo numerosos avances en el campo de VE, aportando al mercado un gran número de prototipo y modelos comerciales con prestaciones muy similares a las de los vehículos de combustión. En contraste, es cierto que

estos vehículos siguen presentando ciertas limitaciones, especialmente en tema de autonomía y de carga.

Actualmente ya se encuentra bastante introducido en el mercado el vehículo híbrido (HEV, Hybrid Electric Vehicle). Este tipo de vehículo mezcla consumo de combustibles fósiles y de electricidad, reduciendo significativamente los niveles de contaminación, pero no del todo. Una alternativa más limpia es el vehículo híbrido enchufable (PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicle) que permite un menor consumo de combustible fósil al contar con unas baterías recargables externamente que aportan una mayor alimentación eléctrica. Pero la alternativa más limpia con diferencia es el vehículo eléctrico puro (BEV, Battery Electric Vehicle) al eliminar de su tracción el motor de combustión y ser la electricidad su única fuente de alimentación. A cambio, este requiere de unas baterías mayores e introduce el problema de la autonomía, el cual se irá solventando a medida que se avance en la tecnología de baterías [6]. Otro problema, en el cual se centra este trabajo, es el relativo a su carga, al poder comprometerse con ella la estabilidad del sistema eléctrico. Es por tanto también motivación de este trabajo el lograr una interacción de los sectores de transporte y de energía eléctrica de cara al futuro.

Para que la interrelación entre ambos sectores sea lo más óptima posible se hace necesaria la regulación de la carga de los VE abriéndose un nuevo campo de negocio y empleo, otra oportunidad más que brinda el VE. En este sentido están surgiendo nuevos proyectos, iniciativas y leyes por parte de los gobiernos y administraciones a nivel mundial. En cuanto al aspecto legislativo en España, por ejemplo, se ha elaborado una modificación de la ley de Propiedad Horizontal para facilitar el acceso a un puesto de recarga para los usuarios, se ha creado la figura del Gestor de Carga y se han impulsado diversas iniciativas de ayuda a la compra de VE, tema desarrollado en el siguiente apartado.

Se concluye por tanto que la popularización y extensión del VE de manera considerable supone a la vez un reto y una oportunidad. Es un reto ingenieril y tecnológico en el campo de las baterías y la carga, suponiendo además la creación de un nuevo agente encargado de estudiar y decidir cuándo cargar qué vehículos y de analizar la conveniencia de retrasar la carga a fin de aplanar la curva de demanda, optimizando en costes de energía y de pérdidas en la red. Pero es a la vez una oportunidad de mejora, de progreso hacia la eficiencia y el aprovechamiento, desarrollando sistemas como el V2G que faciliten la integración de las energías renovables y la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. En definitiva, el VE es una de las áreas de interacción

dentro del concepto de “Smart City”² al que se está encaminando la sociedad y defender esto y facilitar su implementación es la motivación principal que ha llevado al desarrollo del presente trabajo.

1.2 ANTECEDENTES

Analizando el mercado automovilístico actual, queda patente la rápida adaptación por parte de los fabricantes de vehículos a la tecnología del VE. Existen multitud de modelos con prestaciones muy similares a las de los VCI, así como un buen número de proyectos dedicados al análisis y estudio de esta tecnología. A nivel internacional es muy destacable la labor de la compañía Tesla Motors, revolucionando la visión que hasta hace poco se tenía del VE con modelos 100% eléctricos equiparables a vehículos de combustión de alta gama, con autonomías superiores a los 400 km y motores 380CV [7]. También destaca la empresa Electromotive, dedicada a la fabricación e instalación de postes de recarga y con proyectos y estudios para la implantación del VE [8]. A nivel Europeo predominan proyectos MERGE ("Mobile Energy Resources for Grids of Electricity", el mayor proyecto con financiación europea para preparar las redes eléctricas europeas para la implementación de los vehículos eléctricos)[9], G4V ("Grid for Vehicles", analiza el impacto y las posibilidades de una introducción a gran escala de vehículos eléctricos e híbridos enchufables en las redes eléctricas europeas)[10], ADDRESS ("Active Distribution networks with full integration of Demand and distributed energy RESourceS" que desarrollará nuevas arquitecturas para redes activas, basadas en la dotación de inteligencia distribuida a lo largo de la red eléctrica haciendo especial hincapié en los usuarios finales. Esta arquitectura permitirá reacciones de los usuarios en tiempo real en base a señales de precio) [11] y ELVIRE (cuyo objetivo es desarrollar un sistema eficiente que permita neutralizar la “ansiedad de autonomía”³ de los conductores de VE, como por ejemplo el miedo a quedarse sin batería debido a la limitación de autonomía), entre otros. En España destacan las labores de empresas como Endesa (cuenta con un prototipo de Smart City en Málaga, en la cual el VE es una parte importante) [22] e Iberdrola (participante en varios de los proyectos anteriormente

² Dentro del concepto de “Smart City” se integran la mayoría de las áreas de interacción de una ciudad, desde movilidad, energía y medioambiente hasta gobernanza y economía. Integra tecnología, desde la generación y el análisis de datos hasta cómo reaccionar ante ellos, y control remoto, internet, la nube y muchos otros conceptos que están por venir. [80].

³ Se entiende por “ansiedad de autonomía” al miedo a quedarse sin carga en la batería y no poder llegar al destino ni al siguiente punto de recarga. No suele ser una preocupación para el caso de los modelos híbridos enchufables, que cuentan con depósitos de gasolina y pueden rellenarse con rapidez en cualquier gasolinera. Se espera que con el tiempo pueda desaparecer este miedo según se desarrolle la infraestructura de recarga y se incremente la autonomía de las baterías.

mencionados). En cuanto a proyectos, cabe destacar SURTIDOR (Sistema Ultra-rápido de Recarga mediante la Transferencia Inteligente de C.C. por contacto Directo y sistema Opcional de almacenamiento energético de Respaldo) [12] y VERDE (cuya finalidad es investigar y generar conocimiento en los temas clave necesarios para la fabricación y comercialización de vehículos ecológicos en España) [13], además del proyecto MOVELE, incluido en el Plan Integral de Automoción, que se creó como proyecto de demostración de la viabilidad técnica y energética de la movilidad eléctrica en los entornos urbanos. Ha tenido como objetivos destacados la introducción en el parque móvil español de 2.000 vehículos eléctricos y la instalación de más de 500 puntos de recarga para estos vehículos en diversas ciudades [14].

En lo referente al tema de legislación relativa a la carga de VE, como ya se expresó anteriormente, están surgiendo numerosas iniciativas, leyes y proyectos a nivel mundial. En el caso de España, por ejemplo, se ha elaborado una modificación de la Ley de Propiedad Horizontal para facilitar el acceso a puntos de recarga por parte de usuarios que habiten en bloques de viviendas. A tal efecto se acordó la no necesidad de votación para la instalación de un punto de recarga en un garaje comunitario, siendo ahora solo necesaria la comunicación de tal hecho a la comunidad por parte del vecino beneficiario [15]. También existen ayudas para la comprar del VE como es el caso del RD 648/2011 de Ayudas Directas a la compra. Este Real Decreto regula las ayudas a la compra de VE dentro del plan MOVELE aportando una subvención de hasta un 25% del precio de venta del vehículo, con máximo de 6000 para particulares [16]. Otras iniciativas se encaminan al tema de la carga, aquí destaca el RD 647/2011 de Tarifa de acceso supervalve en el cual se introduce la tarifa supervalve para la recarga de vehículos eléctricos en horario nocturno, de 1 a 7 a.m., con precios muy competitivos. En esta iniciativa, al aspecto positivo de cara al consumidor traducido en un considerable ahorro económico si decide enchufar su vehículo por la noche, se le suma el mayor aprovechamiento de las ER, especialmente eólica [17]. Por último, cabe destacar la creación de la figura del Gestor de Carga, autorizado para la reventa de energía. Dentro de la Ley 54/97, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, el RD 647/2011 de Gestor de Carga regula la figura del mismo a fin de autorizarlo como consumidor capacitado para vender electricidad para la recarga de VE. Así, en el artículo 23 del Real Decreto-Ley 6/2010, de 9 de abril, de medidas para el impulso de la recuperación económica y el empleo se reforma la citada ley a fin de incluir en el marco normativo a un nuevo agente que prestará servicios de recarga de electricidad, necesarios para un rápido desarrollo del VE como producto industrial que aúna las características de tecnológicamente innovador,

capaz de generar un nuevo sector de actividad con potencial de crecimiento e instrumento de ahorro y eficiencia energética y medioambiental [17].

1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un modelo, programado en entorno de programación Matlab, que permita simular la potencia solicitada por una comunidad de VE, de cara a tener un modelado de la demanda eléctrica y el consumo total que dichos vehículos le supondrán a la red. Todo ello con vistas a permitir un análisis y evolución del impacto de su implementación a gran escala en el sistema eléctrico actual, permitiendo la simulación de los flujos de potencia asociados a tal población de VE y el estudio de la viabilidad de los sistemas V2G. Se busca, además, aportar unas conclusiones acerca de la influencia que las diferentes estrategias de carga pueden llegar a tener en el dimensionamiento de tal impacto, mediante la implementación de diferentes situaciones y el estudio de sus resultados. También se facilitará una visión de las posibilidades que le ofrecen a la red las comunidades de VE, como la oportunidad de contar con la capacidad de las baterías de los mismos cuando se encuentren conectados. Por último, se incluye el objetivo de cuantificar un coste medio estimado relativo a esta nueva alternativa de movilidad, en un ámbito urbano.

Con todo, los objetivos de este trabajo se resumen en:

- Estudio y análisis del estado del arte de la tecnología de VE, de los hábitos y necesidades relativos a movilidad de los usuarios y de las diferentes estrategias de carga, junto con el funcionamiento del sector eléctrico. .
- Aplicación del Método Monte Carlo al modelo de estudio, introduciendo la dependencia temporal para poder evaluar de manera más realista el impacto que el VE puede tener en la estabilidad de los sistemas de potencia.
- Evaluar el impacto que la carga adicional representada por el VE puede tener en las redes de distribución, mediante la obtención de los consumos totales y las curvas de demanda de una comunidad de VE. Se realiza un análisis tanto en cómputo global como desglosado en función de la opción de carga solicitada. Se contempla carga lenta, tanto en punto de recarga doméstico como público, y carga rápida.

- Aplicación de diferentes perfiles de carga presentados por los usuarios de esta tecnología de movilidad en un mismo modelo de simulación, para la apreciación y determinación del impacto que esto lleva asociado de cara a la implementación de los VEs en las sociedades actuales.
- Realizar un análisis de las curvas de demanda asociada a la comunidad de VE objeto de estudio, tanto la general como la asociada a cada modo de carga diferente, en vista a identificar los intervalos horarios susceptibles de presentar concentración de solicitudes a red.
- Cuantificar el coste económico asociado a la movilidad eléctrica por usuario y día, en función de la tarifa eléctrica que aplique y la hora del día en la cual se efectúe la carga, a fin de aportar la posibilidad de comparativa entre coste de las diferentes modalidades de movilidad.

1.4 ALCANCE DEL TRABAJO

Con la simulación elaborada en este trabajo se pretende aportar una ayuda para resolver la incógnita de si verdaderamente resulta realizable, eficiente y económicamente rentable, no solo implementar el VE en entornos urbanos, sino que además estos vehículos sean usados para el control de la estabilidad de los sistemas de potencia en los mercados actuales, es decir, la viabilidad de los sistemas V2G.

Para garantizar que el modelo aportado sea lo más realista posible, la simulación está basada en el Método Monte Carlo, método probabilístico capaz de representar el comportamiento estocástico⁴ asociado a los componentes de un sistema eléctrico al tener en cuenta la dependencia del tiempo característica de sus estados de funcionamiento.

La demanda eléctrica de las comunidades de VE se ve determinada por dos vías de influencia:

- Del lado del usuario de VE, mediante sus hábitos de movilidad.
- Del lado del propio VE, mediante las características técnicas de este.

⁴ Se entiende por *comportamiento o proceso estocástico*, en la teoría de la probabilidad, al concepto matemático que permite la caracterización de una sucesión de variables de carácter aleatorio (estocásticas) que evolucionan en función de otra variable, generalmente el tiempo. Cada una de las variables aleatorias del proceso tiene su propia función de distribución de probabilidad pudiendo existir o no correlatividad entre ellas.

Por este motivo, se parte realizando un estudio y análisis del estado del arte de ambos campos para finalmente tomar la decisión de qué aspectos, de cada uno de los dos campos, son los de mayor influencia para el objetivo de este trabajo.

Queda fuera del presente trabajo la introducción del modelo en una red de distribución de prueba para la evaluación de su impacto, centrándose solo en la simulación de la corriente de potencia que será demandada en un único sentido, del vehículo a la red.

1.5 ESTRUCTURA

A lo largo del presente capítulo 1 se realiza una introducción y puesta en situación del estado actual en materia de medio ambiente, concienciación y medidas adoptadas y por adoptar. Además se expone el alcance del proyecto y las hipótesis y objetivos que se han asumido y seguido. A este le sigue una profundización aún mayor en el tema del VE, la movilidad urbana y consumo eléctrico y modelos de demanda, junto con aspectos referentes al sector eléctrico y la integración de VE, que se lleva a cabo en el capítulo 2. En él se expone el estado del arte de estos campos, se describen las diferentes estrategias de carga tenidas en consideración en este trabajo y su situación tecnológica y legal actual, se detallan aspectos relacionados con las baterías y los distintos modelos de VE del mercado y se aporta una visión global de las metodologías para la simulación de la demanda eléctrica y del sector eléctrico. Hasta aquí la visión general del campo de estudio y la puesta en situación.

A partir del citado capítulo 2 se trata el tema práctico en sí, es decir, se describe el modelo elaborado y se detallan los resultados y conclusiones. Así, en el capítulo 3 se expone la metodología seguida para el diseño del modelo de simulación, y se hace una descripción detallada del programa implementado en Matlab, del funcionamiento del algoritmo y de las suposiciones e hipótesis que se han adoptado para su elaboración. Por último, en el capítulo 4 se hace uso de una comunidad modelo de prueba para la simulación del modelo. Se obtienen una serie de resultados acordes con la citada comunidad que son analizados y de los cuales se extraen las conclusiones oportunas. Se aporta así mismo un presupuesto relativo a movilidad y una comparativa de diferentes estrategias de carga y se analiza su influencia en la demanda. Las conclusiones generales, así como una visión global del enfoque que se ha deseado dar al presente trabajo y de las posibilidades de lo aquí tratado, se desarrollan al final de la memoria.

Para finalizar se aportan una serie de anexos que profundizan en mayor medida en aspectos considerados interesantes acerca de la tecnología de VE, como son los componentes fundamentales encargados de la tracción y autonomía de estos vehículos, y del sector eléctrico, su funcionamiento y operabilidad, junto con la generación, transporte y distribución de la energía eléctrica. Se incluyen también tablas y gráficas clarificadoras de lo expuesto a lo largo de los capítulos 3 y 4, a modo de ayuda para la comprensión de lo explicado en ellos.

1.6 HIPÓTESIS GENERALES

A continuación se exponen las principales suposiciones, hipótesis y consideraciones tomadas:

- Sólo son tenidos en consideración vehículo eléctricos puros (BEV), al ser estos los que presentan unos requisitos más elevados a la red de distribución. Dentro de estos se presentan diferentes modelos, en función del tipo de usuario que se esté estudiando en cada caso.
- Los modos de carga utilizados son carga lenta y carga rápida. La carga lenta considerada se realiza a 230V y 16A en corriente alterna. Por su parte, la carga rápida es en corriente continua a 400V y 125A. Se da prioridad a la recarga lenta, por ser la que reporta mayores beneficios tanto a usuario como a sistema, recurriendo tan solo en los momentos necesarios al modo de carga rápida. Para ambos modos, se consideran unas pérdidas en la infraestructura de recarga del 15%. En ninguno de los casos se ha tenido en cuenta del limitador de la cantidad de corriente, ICP⁵ (Interruptor de Control de Potencia), al ser su influencia prácticamente despreciable (limitaría de 16A a 15A en lenta y nada en rápida). Aun así, estos datos pueden variarse al inicio del código del programa de forma tal que se adapten a otras necesidades o normativas.
- Se ha supuesto que todos los VE utilizan el mismo tipo de cargador, a igualdad de modo de carga seleccionado. Así mismo, se supone que cada vez que el VE realice una parada,

⁵ Según el Real Decreto 1454/2005 se establece la obligatoriedad de que toda instalación eléctrica disponga de un limitador de cantidad de corriente consumible simultáneamente. El ICP limita la intensidad eléctrica máxima a 5A, 10A, 15A, etc. para el establecimiento de la potencia contratada.

con independencia de la duración de la misma, dispondrá de un punto de carga libre tanto para carga lenta como carga rápida y, por tanto, posibilidad de realizar una carga.

- En cuanto a la demanda eléctrica, se considera solo el régimen estacionario. Esto supone que tanto transitorios como armónicos quedan fuera del alcance de este trabajo.
- Al inicio de cada simulación todos los VE contarán con sus baterías completamente cargadas. Para guardar coherencia con esto, al final de cada simulación se realizará una carga de tipo lenta completa de cada batería partiendo de la hipótesis de que el último desplazamiento que realice cada VE será de regreso al lugar de estacionamiento habitual.
- Todo usuario realiza al menos dos desplazamientos en un día de simulación, garantizando ida y vuelta al lugar de aparcamiento habitual del VE. Solo se consideran como agentes intervinientes en el modelo simulado aquellos residentes en el área geográfica considerada. Así pues, no se considera en el cálculo de demanda aquellos usuarios que, no siendo residentes en tal área, pudieran entrar en la misma. En cambio, sí se considera la posibilidad de que un usuario de la comunidad realice desplazamientos fuera del área de estudio.

CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN HISTORICA Y ESTADO DEL ARTE

A lo largo del siglo XXI la tecnología ha avanzado a pasos agigantados haciendo tanto avance y desarrollo que muchos de los modelos creados hace años hayan llegado a un punto de inflexión y requieran de un verdadero cambio, como es el caso del transporte. Básicamente la necesidad de cambio en el transporte se fundamenta en dos motivos: uno es la energía y el otro la protección del planeta, pero la solución de ambos parece venir de la mano de la electricidad. La electricidad es una de las principales formas de energía usadas en el mundo actual, sin la cual ninguno de estos avances sería posible pero que aún a día de hoy presenta una gran limitación: la imposibilidad de ser almacenada a gran escala. Este hecho hace imprescindible equilibrar permanentemente generación y consumo, para lo cual se ha de pronosticar la demanda periódicamente y de manera continua, a fin de hacer frente al tiempo de respuesta requerido por los productores para suplir la energía necesaria.

El consumo energético, tanto en ámbito laboral, doméstico como industrial, se ve influenciado por numerosos factores que dificultan su previsión. Si a esto se le suma la vital importancia que tiene el disponer de una previsión lo más realista posible en todo momento para el buen funcionamiento del sistema, se entiende que los modelos de estimación de demanda eléctrica sean un tema muy desarrollado [18]. Los más recientes incluyen métodos ingenieriles, estadísticos e incluso de inteligencia artificial, como las redes neuronales artificiales (Artificial Neural Networks, ANNs), familia de algoritmos de aprendizaje inspirados en las redes neuronales biológicas, y las máquinas de soporte vectorial (Support Vector Machines, SVMs), conjunto de algoritmos de aprendizaje supervisado relacionados con problemas de clasificación y regresión.

A pesar de la cantidad de modelos de demanda desarrollados y de su más que aceptable buen funcionamiento, estos están orientados a unas necesidades de consumo actuales que no incluyen factores de movilidad. Por esta razón, si se quiere electrificar el transporte, se han de desarrollar nuevos modelos de previsión de demanda que incluyan estos factores de cara a poder evaluar el impacto que podría suponer en el sistema la introducción del VE, para lo cual es necesario conocer la demanda eléctrica que este llevaría asociada. Para modelar la demanda

de una comunidad de VE se han de tener en cuenta tanto los parámetros del propio vehículo (capacidad de baterías, consumo...) como datos de movilidad de los usuarios (número de trayectos, distancia y duración de los trayectos...). Una vez se dispone de una previsión más o menos certera se puede realizar una evaluación de impacto, valorando el tipo de red en la cual se conectaría el VE, el número de vehículos que se conectarían a ella así como el número y tipo de puntos de recarga que haya en la misma.

Pero el interés por el VE y su impacto en el sistema no es algo tan novedoso. Las primeras investigaciones acerca del impacto de la carga de VE se remontan a la época de los ochenta. En 1883, Gerald Thomas Heydt publicó un artículo en el que exponía los perfiles típicos de conducción y concluía que la recarga de los VE muy probablemente coincidiría con los picos de demanda y por lo tanto sería necesario llevar a cabo una recarga controlada de los mismos [19]. En ese mismo año Michael M. Collins y Gerald H. Mader elaboraban una lista con los parámetros que influían más en la carga de VE y comparaban los precios fijos de la electricidad, valorando diferentes tecnologías de generación, con la recarga de VE [20]. Ya en 1998, A. Haider fue un paso más allá en los estudios desarrollados por Heydt al encontrar una relación entre el aumento de la demanda en horas pico y la falta de puestos de recarga en áreas de trabajo o en la vía pública [21]. El creciente interés que existe a día de hoy en relación al VE, su implementación y la adecuación de los sistemas a esta nueva modalidad de transporte, hace que se estén desarrollando muchos más trabajos y proyectos ofreciendo detallados análisis de impacto en la red y modelos de demanda.

2.1 EL VEHÍCULO ELÉCTRICO

Se conoce como Vehículo Eléctrico a aquel de cuya tracción se encargan uno o varios motores eléctricos que transforman la energía eléctrica aportada por las baterías, superconductores u otros medios, en energía mecánica comunicada a las ruedas.

2.1.1 INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO HISTÓRICO

En contra de lo que pueda parecer, el concepto de VE no es, ni mucho menos, nuevo. Uno de los primeros automóviles que se desarrollaron fue eléctrico, anterior o coetáneo al motor de cuatro tiempos sobre el que se basó el automóvil de combustión. El origen exacto del VE es un tanto controvertido aún a día de hoy. Mientras que existen estudios que defienden que fue el escocés Robert Anderson entre los años 1832 y 1839 el inventor del primer vehículo eléctrico puro, otros afirman que el primer hombre en ensamblar un VE fue Gustave Trouvé en Francia en el año 1881 y la mayoría data su origen en 1894 con un modelo fruto del trabajo de Pedro Salom y Henry Morris. Lo que sí parece claro es que el mérito de la creación del motor eléctrico es de Michael Faraday, con la construcción en 1821 de dos aparatos capaces de producir rotación electromagnética, como él lo denominó, que es lo que a día de hoy se conoce por motor eléctrico.

Justo antes de 1900 los VEs comenzaron a despuntar en velocidad y distancias recorridas. Cabe



Imagen 1. "Jamais Contente", Camille Jenatton. 1899

destacar la ruptura de la barrera de los 100 km/h protagonizada por el VE diseñado por Camille Jenatton en 1899 llamado "Jamais Contente", Imagen 1. Entre 1900 y 1914, el vehículo eléctrico se puso de moda especialmente entre la clase alta, consiguiendo incluso la atracción de una nueva clientela, las mujeres de clase alta, gracias a la facilidad y seguridad que estos coches proporcionaban en contraste con los de combustión.

Además, la tecnología de acumuladores estaba en constante desarrollo, tanto con mejoras de los modelos existentes como con la creación de otros nuevos.

Pero la implantación del sistema de producción en cadena de montaje de manera masiva, por parte de Ford en 1908 y, especialmente, la invención del arranque eléctrico de Cadillac en 1913⁶, dio la vuelta al mercado automovilístico. El vehículo eléctrico fue cayendo en el olvido a medida que las mejoras en los VCs se iban sucediendo. Así pues, a finales de 1920 la tracción eléctrica

⁶ El sistema de arranque de los vehículos con motor de combustión anterior al arranque eléctrico consistía en un sistema compuesto por una manivela que hacía girar un volante de inercia y que debía accionarse manualmente. Esto complicaba y hacía peligroso el arranque de los vehículos de combustión, que requerían de unas habilidades y conocimientos específicos en el tema, no solo para el arranque sino para la movilidad en general con este tipo de vehículos.

quedo relegada a aplicaciones industriales muy concretas, tales como los toros elevadores o los montacargas.

Fue en 1996 cuando comenzó el resurgir de esta tecnología de tracción limpia y desde entonces no ha parado de desarrollarse y extenderse a nivel mundial hasta nuestros días, perfilándose como la opción que dominará mayoritariamente el sector del transporte en el futuro.

A continuación se puede ver una línea cronológica que representa la evolución del VE a lo largo de la historia. Imagen 2.

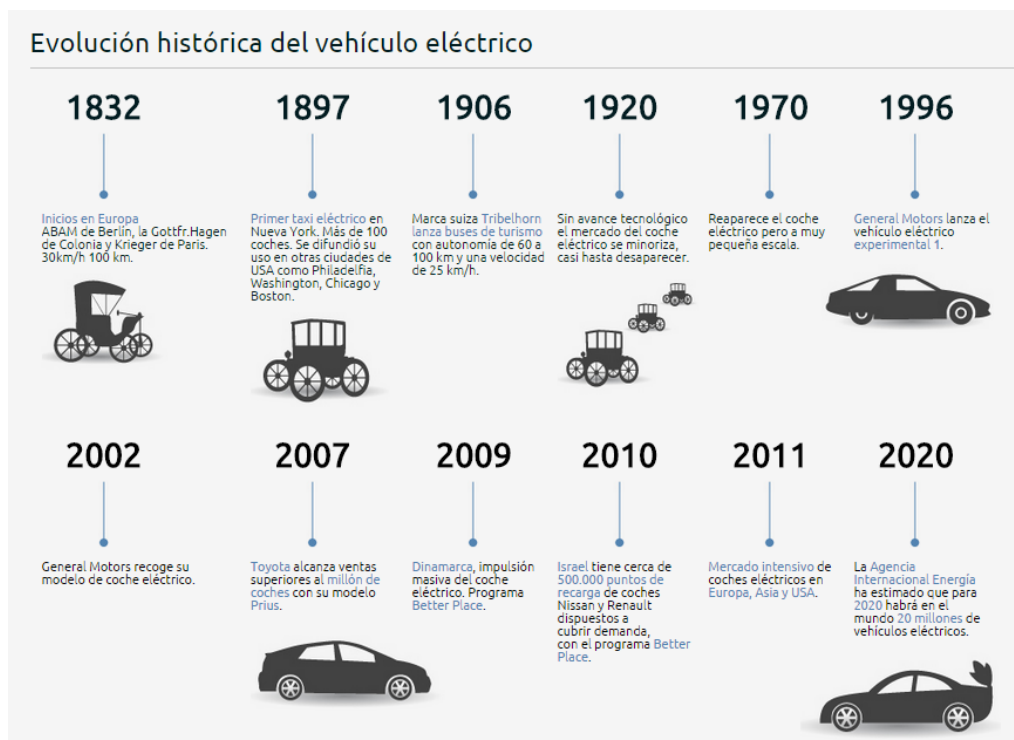


Imagen 2. Evolución histórica del Vehículo Eléctrico, VE. ENDESA [22]

2.1.2 ARQUITECTURA, TIPOLOGÍA Y MODELOS DE VE

Dentro del concepto de VE, existen diferentes categorías atendiendo a las fuentes que le proporcionen la energía eléctrica que necesita. Los más populares y comercializados son aquellos que disponen de dicha energía almacenada a bordo con sistemas recargables⁷, dentro de los cuales se incluyen los vehículos eléctricos puros y los híbridos. Pero también existe una modalidad de VE cuya arquitectura permite la generación eléctrica en el mismo durante su desplazamiento, bien sea mediante placas solares o mediante células de combustible.

En el presente trabajo se hace referencia como VE a aquel que hace uso de energía almacenada a bordo en baterías, ya que serán estos los que puedan enchufarse a la red y por tanto los que afecten al sistema eléctrico, que es lo que se quiere estudiar. Dentro de estos, se pueden diferenciar dos categorías fundamentales, los vehículos híbridos eléctricos y los vehículos eléctricos puros.

2.1.2.1 VEHÍCULOS HÍBRIDOS ELÉCTRICOS

Se considera que un vehículo es híbrido cuando consta de dos o más sistemas de almacenamiento de energía (normalmente depósito de combustible y batería eléctrica) y una doble motorización (térmica y eléctrica), ya realicen la tracción de manera conjunta o individual.

Dentro de esta categoría se diferencian tres tipos:

- El *híbrido no enchufable (HEV)*, en el cual se combinan motor de combustión interna con motor eléctrico. Pueden ser híbridos serie o híbridos paralelos y constituyen el tipo de VE más extendido en el mercado a día de hoy. En ellos, la batería es recargada únicamente mediante el sistema de frenado regenerativo, durante las frenadas o las pendientes descendientes. Este tipo de vehículos mejora la eficiencia de los de combustión gracias a la recuperación y al almacenamiento de energía, pero siguen constituyendo una fuente considerable de emisiones de GEI. En la actualidad son diversos los modelos de esta tipología comercializados en el mercado, destacando entre ellos el Toyota Prius, el Ford Escape Hybrid y el Ford Fusion Hybrid.

Esta tipología queda fuera del alcance de este trabajo ya que no se conectan a la red, no afectando al sistema eléctrico.

⁷ El almacenamiento de la energía eléctrica en este tipo de vehículos se puede llevar a cabo mediante baterías (vehículo eléctrico de batería), en supercondensadores o mediante volante de inercia sin rozamiento.

- El *híbrido enchufable (PHEV)* se basa en los mismo principios que el anterior pero añadiendo la posibilidad de ser enchufado a la red para la recarga de la batería cuando el vehículo está parado. Por esta razón, cuenta con baterías de mayor capacidad que el tipo HEV, pero a su vez inferiores que las del eléctrico puro. Este tipo de vehículo sigue generando emisiones de CO₂, en unos niveles dependientes del uso que se dé del régimen eléctrico. Con esta tipología en el mercado actual se tienen ejemplos como el Toyota Prius Plug-in Hybrid comercializado en Japón, Estados Unidos y Europa; el Volvo V60 Plug-in Hybrid en Suecia y el Ford C-Max en Estados Unidos.

Dentro de los PHEV se diferencian dos tecnologías:

- El *PHEV serie*, en el que la propulsión directa del vehículo corre a cargo exclusivamente del motor eléctrico, quedando el de combustión relegado a la función de carga de la batería. Este hecho reporta la ventaja de poder mantener el motor de combustión funcionando durante más tiempo en su régimen más óptimo, ya que ambos motores no giran con el mismo régimen de vueltas.
- El *PHEV paralelo*, en el cual el par total que impulsa el motor es la suma del par entregado por el motor eléctrico y del par entregado por el motor combustión, es decir, permite un dimensionamiento menor de ambos motores, traduciéndose en un menor coste.

Esta tipología también queda fuera del alcance de este trabajo ya que, aún a pesar de que sí son conectados a la red, sus requerimientos de electricidad son menores y por tanto menos crítico es su impacto al sistema eléctrico.

2.1.2.2 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS PUROS

Los vehículos eléctricos puros cuentan exclusivamente con motores eléctricos, como sistemas de propulsión, y baterías recargables en red, como sistema de alimentación. A pesar de que también cuentan con sistema regenerativo, presentan la mayor limitación de autonomía por la capacidad de sus baterías. A cambio, no produce ruido y cuenta con emisiones cero durante su movilidad, si bien no es del todo justo clasificarlo como de emisiones cero porque habría que tener en cuenta las generadas para obtener la energía eléctrica de la que hace uso. Quizá dentro de esta tipología de VE, los modelos más destacados son los comercializados por la compañía Tesla Motors que ofrece vehículos 100% eléctricos con elevadas prestaciones y autonomía.

Destaca el Tesla Model S que puede encontrarse en el mercado en tres versiones: una de 306CV y autonomía de 375km, otra de 367CV y autonomía de 502km y la última de 422CV con una autonomía de 502km, si bien es cierto que los precios de estos vehículos resultan un tanto elevados: 59.159€, 68.452€ y 81.278€, respectivamente. Modelos más económicos son el Smart For Two Electric Drive, el Volkswagen e-up! y e-Golf, el Renault ZOE, el BMW i3 y el Nissan Leaf, cuyas prestaciones se encuentra recogidas en la tabla incluídas en el Anexo IV.

En la Imagen 3 se pueden apreciar esquemas de la arquitectura de cada uno de los modelos anteriormente descritos.

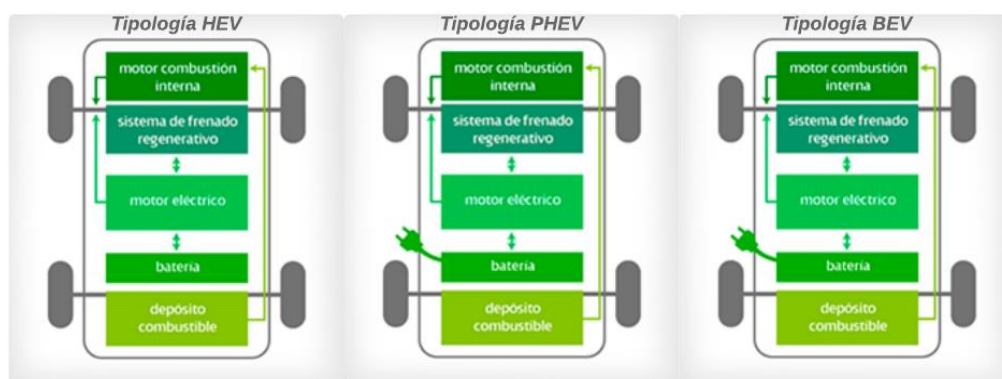


Imagen 3. Tipología de Vehículos Eléctricos.

Hoy en día prácticamente todos los fabricantes de automóviles tienen en marcha al menos un proyecto o han sacado ya al mercado uno o más VE. Existen también compañías dedicadas en exclusiva al mercado de los VE puros como en el caso de Th!nk y Tesla.

2.1.2.3 ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS SEGÚN TIPOLOGÍA DE VE

Es obvio que el impacto causado a la red por un VE puro, o BEV, no va a ser el mismo que el que cause un híbrido enchufable, o PHEV, lo que ocurre es que al tratarse de una tecnología en proceso de desarrollo no se conoce el grado de penetración que va a tener en la sociedad cada tipología de VE. Existen numerosos artículos y estudios publicados que recogen el comportamiento y los consumos de las distintas arquitecturas aquí expuestas, algunos de ellos se centran solo en una de ellas mientras que otros apuestan por una combinación de ambas. Parece que lo más realista es basar el estudio en la implementación de ambas tipologías de VE actualmente comercializadas, es decir, BEV y PHEV. En cambio, si el estudio se centrara solo en

la tipología BEV y considerase que todos los VEs de la comunidad que quiere estudiar son de esta tipología lograría los resultados más conservadores posibles, permitiendo el análisis del peor de los casos que podría darse para esa comunidad y, por tanto, la peor situación para la red que lo soporte. Siguiendo este razonamiento, junto con el hecho de que a día de hoy faltan datos claros para conocer el impacto real de implementar esta tecnología, en este trabajo se ha optado por seguir esta estrategia, utilizando solo vehículos de tipología BEV.

Ejemplos de estudios en los que solo se tiene en cuenta la tecnología de híbrido enchufable se pueden encontrar en el artículo [23], donde los autores enfatizan las ventajas que una carga controlada de PHEVs ofrece a la operabilidad de una red de distribución residencial frente a la repercusión negativa de una carga descontrolada en la eficiencia de tales sistemas, y en [24] donde también se elabora un análisis del impacto de los PHEVs en una red de distribución. En [25] se presenta un escenario para la integración de las ER y los PHEVs en redes inteligentes. Basándose en diferentes escenarios de recarga, el artículo [26] analiza el impacto de la integración de PHEVs en el sistema eléctrico francés y [27] muestra tres posibles escenarios que representan diferentes horarios de recarga en un día con PHEVs y su impacto en el sistema. En él se muestran las posibles ventajas que el impacto de una nueva carga agregada, la representada por los VE, puede aportar al funcionamiento de los sistemas de distribución.

También sobre el impacto del nuevo modelo de consumo que representa una comunidad de VE se habla en [28], donde defiende la importancia de analizar este impacto junto con el coste operacional de los sistemas como medio de estimación del coste de los procesos de carga/descarga de los BEV.

En el artículo [29] se presentan una serie de ecuaciones desarrolladas para el cálculo de la capacidad requerida a las redes eléctricas por tres tipos de VE: PHEV, BEV y los de pila de combustible.

Para una mayor profundización en el estado actual de este mercado, se incluyen las tablas del Anexo de la página 143, donde se recogen los modelos más destacados comercializados a día de hoy con sus características técnicas a nivel de motor eléctrico, de baterías y de dimensiones. Todos ellos aparecen recogidos en el Plan Movele que adjudica ayudas para la compra de VE en el territorio español.

2.1.3 COMPONENTES DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

A simple vista los VEs resultan altamente semejantes a los VCI, pero a nivel interno esto no es así. La tecnología de VE supone una renovación prácticamente total del interior de un vehículo tal y como se conoce a día de hoy, reduciendo significativamente el número de componentes con su consecuente reducción de averías. Se eliminan los sistemas de lubricación, refrigeración, distribución y escape característicos del motor térmico. Así mismo quedan suprimidos la caja de cambios y el embrague, usando en su lugar un mecanismo de transmisión mucho más simple.

La arquitectura del VE se basa en:

- Uno o varios motores eléctricos, encargados de su propulsión mediante la transformación de la energía eléctrica procedente del sistema de alimentación en energía mecánica que es comunicada a las ruedas.
- Una batería principal de gran tamaño, combinación de múltiples celdas individuales en función de la tensión que se desee lograr y que se encarga de almacenar la energía procedente de la fuente de recarga y de alimentar con ella el conjunto del VE.
- Alguna batería auxiliar, normalmente de 12V, para la alimentación de los componentes eléctricos auxiliares del coche.

Todo ello supervisado por un sistema electrónico que controla todos los sistemas de generación de potencia y el estado de las baterías, a la vez que gestiona la transmisión dentro del vehículo. Otros componentes necesarios serán el cargador, encargado de absorber la electricidad directamente de la red y comunicársela a la batería; y el conversor, cuya función es transformar la Corriente Continua (DC, Direct Current) en alta tensión a la salida de la batería principal en DC de menor tensión para la alimentación de las baterías auxiliares. También incluye un inversor para volver a convertir en Corriente Alterna (AC, Alternating Current) la corriente en DC a la salida de las baterías y así alimentar el motor, solo presente en vehículos con motor de corriente alterna.

La práctica totalidad de elementos y sistemas que componen el VE están regulados por medio de diferentes normas específicamente elaboradas para los VEs y aprobadas en su mayoría por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, International Electrotechnical Commission).

Se ha considerado interesante la inclusión, al final de la presente memoria, de una descripción más detallada acerca del motor eléctrico y de las baterías, en modo de breve presentación de las alternativas actuales en estos campos, al tratarse de los pilares fundamentales de la propulsión de VE. Pero se ha optado por su elaboración como Anexo en la página 157, al salirse del objetivo propio y fundamental del presente trabajo, la modelización de la demanda asociada a una comunidad de VE.

2.1.4 ESTADO DEL ARTE DE LAS BATERÍAS

Las baterías constituyen uno de los elementos de mayor importancia en un VE y al mismo tiempo uno de los más problemáticos, causante de quizá los dos mayores inconvenientes conocidos de tales vehículos: la autonomía y el precio de mercado. Esto lo convierte en un elemento altamente susceptible de estudio y muy a tener en cuenta en todo proyecto relacionado con VE, su tecnología y su implantación, no en vano representan una de las variables fundamentales en la determinación de la demanda eléctrica asociada a ellos. Por este motivo, como se ha mencionado, en el presente trabajo se ha optado por incluir una breve presentación del tema al final de esta memoria y se ha realizado un análisis del estado del arte de las mismas, cuyas conclusiones se exponen a continuación.

Si bien el tema de las baterías no se suele tratar como un tema individual en muchos artículos científicos, es cierto que la mayoría de los artículos y libros que hablan acerca de la tecnología de VE dedican algún apartado a este campo. Por ejemplo, en el libro [30] sobre la tecnología de VE se dedica un capítulo entero a analizar las baterías como sus fuentes de energía. En [31] se expone el estudio realizado durante tres años por parte del EPRI centrado en las baterías de NiMH, mostrándose el gran avance vivido por esta tecnología en los últimos años hasta 2003, si bien como se ha dicho a día de hoy se confía más en la tecnología de Ion-litio. Este tipo de tecnología es analizada en [32], donde el estudio expuesto se centra en el uso de baterías Ion-litio y ultracondensadores carbono/carbono como la tecnología de fuente de energía preferente de ser usada en los futuros vehículos, apostándose por que la decisión entre ambas tecnologías dependerá del coste y la vida útil que se consiga en cada una. En [33] también se aporta una descripción del estado del arte de baterías y ultracondensadores analizándose también su implementación en vehículos de celda de combustible, tecnología usada por otro tipo de vehículo, el de hidrógeno, también perfilado como vehículo del futuro.

2.1.5 LA RECARGA DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Vinculados a los problemas de autonomía, generados por la tecnología actual de baterías y los ciclos de vida y alto coste de las mismas, están los que presenta su recarga. Estos derivan de la falta de emplazamientos y la poco desarrollada infraestructura de carga de las ciudades actuales. Cabe destacar que la recarga de baterías también puede producir perturbaciones en el sistema de distribución debido a la distorsión armónica, aunque tal impacto puede ser mitigado equipando los cargadores con filtros de red adecuados. Todo esto ha frenado hasta ahora la electrificación del transporte, sin embargo gracias a los apoyos por parte de los gobiernos y las diferentes medidas de impulsión para este sector, junto con una mayor concienciación y las previsiones tan alentadoras que presenta el mercado del VE [34], se puede decir que la movilidad eléctrica es ya una alternativa real.

Se entiende por recarga de VE al suministro de electricidad de manera segura y eficiente, existiendo básicamente dos formas distintas de llevar a cabo tal suministro. Una forma es mediante conexión conductiva vía tomas de corriente, protecciones, equipos de medida y conductores de sección adecuada, estando regulada por la normativa IEC 61851. La otra forma es mediante sistemas inductivos que utilizan los campos magnéticos para transmitir energía a través del simple contacto entre el dispositivo emisor y el dispositivo receptor, de modo tal que se evita la utilización de cables y los procesos de conexión y desconexión. Este tipo de recarga se encuentra regulada por la normativa IEC 61980 y, aunque a simple vista puede parecer un sistema mucho más avanzado y cómodo, es menos usado en el campo del VE debido al porcentaje de pérdidas que lleva asociado a día de hoy, aunque se continua investigando en este sentido. Debido a que el objetivo principal es la estimación de la demanda asociada a una comunidad de VE y no el desarrollo de una infraestructura de carga, este trabajo se centra en los procesos de recarga conductivos al ser los que se encuentran implementados actualmente, pero es perfectamente adaptable a los inductivos en el momento en que estos estén más desarrollados, gracias al comportamiento de los usuarios en temas de recarga adoptado en la simulación.

La norma IEC 61851-1, además de establecer los requerimientos para la carga en corriente alterna y para los cargadores en corriente alterna y corriente continua⁸, establece cuatro modos de carga de VE:

- **Modo 1.** Tipo de recarga lenta en AC con una corriente máxima de 16A por fase, lo que supone una potencia máxima de 3,7kW en conexión monofásica y de 11kW en conexión trifásica. Este modo de carga no requiere de un conector específico para VE, es decir, es un tipo de conexión no dedicada⁹. La instalación cuenta con protección magnetotérmica y diferencial y la conexión del VE a la red se lleva a cabo mediante tomas de corriente normalizadas, siendo el VE el que incorpora el cargador con control del proceso de carga de la batería.
- **Modo 2.** Nuevamente se trata de un tipo de recarga lenta en AC, pero con un valor máximo de corriente de 32A por fase y potencia máxima de 22kW. Al igual que el modo 1, se trata de una conexión no dedicada con protección magnetotérmica y diferencial y es el VE el que ha de contar con el dispositivo encargado de regular la carga de la batería. Este modo requiere de la existencia de un conductor piloto, para la fijación de los parámetros del proceso de carga y el control de la fiabilidad de la conexión, que asegure la no existencia de tensión en la conexión en ausencia de vehículo conectado.
- **Modo 3.** En este modo el VE, para su recarga, utiliza un sistema de alimentación específico y una toma especial y exclusiva para cada VE, tratándose pues de una conexión dedicada¹⁰. El tipo de carga es lenta o semi-rápida de tensión monofásica de hasta 250V y trifásica de hasta 480V, no excediéndose nunca los 32A. Junto con la función de control piloto, el sistema permite la identificación del VE y las características de carga, permitiendo determinar la secuencia de carga y la seguridad de conexión. Así pues se posibilita el control de potencia, pudiendo adoptar estrategias de recarga inteligente en los casos en que sea posible gracias a la existencia de múltiples puntos de recarga en las instalaciones.
- **MODO 4.** Cuenta con lo que se ha denominado carga rápida o ultrarrápida llevada a cabo en DC y con unos valores de tensión, corriente y potencia elevados (a 500V y 125A

⁸ Esta norma diferencia entre tres casos de conexión para cables: Case A, donde el cable está permanentemente unido al coche; Case B, donde el cable no está unido a nada; Case C, donde el cable está permanentemente unido al puesto de recarga.

⁹ Se entiende por punto de conexión no dedicado aquel al cual puede conectarse cualquier VE, pensado para ubicaciones públicas tales como aparcamientos públicos, trabajo, centros comerciales y la propia vía pública. En él se llevará a cabo la identificación del usuario y, según la relación comercial establecida entre este y la compañía suministradora, así se realizara el cobro y servicio de la energía consumida.

¹⁰ En un punto de conexión dedicado el usuario al que se cobra la energía es siempre el mismo y está pensado para el sitio de estacionamiento habitual de VE, tal como el punto doméstico.

suministrando 50kW). Esto permite una carga en un intervalo de tiempo de entre 10 y 30 minutos, para unos límites de entre el 20 y el 80% del nivel de carga de las baterías. Se lleva a cabo en conexión directa del punto de recarga a la batería, en DC a través de toma y conductor especial.

En los modos 1,2 y 3 tanto el control de recarga como el inversor están en el interior del vehículo, a diferencia del modo 4. En los modelos más reciente de VE presentes en el mercado se han incorporado dos tomas diferentes, una para la recarga en modo 1,2 y 3 y otra para la recarga en modo 4, la cual cuenta con mayores dimensiones y unas características eléctricas especiales que posibiliten el acceso directo, en DC, a las baterías.

Por su parte, la norma IEC 62196 detalla las características técnicas para enchufes y conectores de los diferentes modos de recarga. La IEC 62196-1 define estándares generales comunes para las cargas en AC y DC, la IEC 62196 -2 define los estándares para carga en AC (modos 1-3) y la IEC 62196-3 recoge estándares para carga en DC (modo 4). Los diferentes tipos de conectores para vehículo eléctrico son: el conector Schuko, habitual en Europa para motos y bicicletas eléctricas y con capacidad máxima de 16A; SAE J1772 o tipo 1 o Jazaki, desarrollado en Estados Unidos es el conector por excelencia de los coches eléctricos; Mennekes o tipo 2, diseñado más recientemente en Alemania al que se le augura un prometedor futuro en Europa; y Scame, enchufe de tipo 3 que permite hasta 22kW de potencia y cuyo cable ofrece salida a SAE J1772 o Mennekes.

Para facilitar la introducción masiva de VE en la sociedad se ha de trabajar en la estandarización tanto de puestos de recarga como de conectores. En este sentido, además de las citadas normas, los fabricante trabajan en la elaboración de protocolos de recarga. El primero se desarrolló en Japón bajo el nombre CHAdeMO (CHArge de MOve). Este determina fundamentalmente las comunicaciones entre el VE y el punto de carga rápida, de tal forma que el cargador fija el nivel de corriente DC que cumple las consignas que el VE envía al controlador a través de un bus CAN. Así se hace posible una recarga rápida y óptima, ya que el BMS tiene en cuenta tanto el rendimiento de la batería como es estado del entorno de uso. Con el objetivo de garantizar un nivel adecuado de seguridad, existe redundancia entre las protecciones y las comunicaciones. CHAdeMO Association fue formada en 2010 y la componen The Tokyo Electric Power Company, Nissan, Mitsubishi, Subaru y Toyota [35]. A nivel europeo se está desarrollando el denominado CCS (Combined Charging System), que como su nombre indica es un sistema de

carga combinada en AC y DC apoyado por todos los miembros de ACEA¹¹ (European Association of Automotive Manufacturers). Este establece un único conector del lado del vehículo para recarga en AC, tipo 1 y 2, con espacio para un conector de dos pines CC de hasta 200A.

No se ha de confundir modo de recarga o tipo de conector, hasta ahora mencionado, con tipo de recarga. Estos últimos se definen en función de la velocidad de recarga, directamente dependiente de la potencia disponible. En principio se hace distinción entre cinco tipos de recarga: super-lenta, con una corriente limitada a 10A, necesita de 10 a 12 horas; lenta o convencional, a 16A con 3,6kW y 6-8 horas; semi-rápida, a unos 22-25kW y 1-2 horas; rápida, a 44-50kW y 30 minutos para recarga del 80-90%; super-rápida, la utiliza por ejemplo el Tesla Model S con 90-120kW y unos 20 minutos para 250km; y por último la ultra-rápida, es algo aún experimental que plantea una recarga a 130-150kW y tiempos de 5 a 10 minutos. Lo más normal es que se resuman en dos tipos: lenta y rápida, o incluso tres: lenta (tipo 1), semi-rápida (tipo 2) y rápida (tipo 3), como pasa por ejemplo en [36, 37]

Bajo la intención de estandarizar este sector y facilitar la expansión del VE, Europa se está posicionando a favor de un tipo de conector y de un protocolo de carga. La Comisión Europea ha presentado una propuesta de ley que pretende hacer obligatorio el uso del estándar Mennekes, para la conexión con el punto de recarga en corriente alterna, y el Parlamento Europeo planea aprobar un borrador mediante el cual se prohíba la comercialización de VE con sistema de recarga rápida CHAdeMO a partir del 31 de diciembre de 2018, lo que pondría fin a la batalla entre formatos CHAdeMO y CCS.

El ámbito de recarga de VE que afecta en mayor medida al sector eléctrico se desarrolla en el apartado 2.3, junto con una descripción del sector eléctrico y el impacto que puede suponer la introducción de esta nueva carga en él. Se completan los aspectos referentes a sector eléctrico en el Anexo de la página 167, incluido al final de la presente memoria.

ESTADO DEL ARTE DE LA INFRAESTRUCTURA PARA LA CARGA DE VE

Tanto los modos y tipos de recarga como la infraestructura son variables que influyen en la demanda eléctrica asociada a los VE y, es por ello, que se han de tener en consideración en los estudios orientados a la previsión y simulación de esta. En la mayoría de tales estudios realizados

¹¹ Integrada por Audi, BMW, DAF, Daimler, Fiat, Ford Europe, General Motors Europe, Hyundai Motor Europe, Jaguar, Land Rover, MAN, Porsche, PSA, Renault, Scania, Toyota Motor Europe, Volkswagen, Volvo Cars y AB Volvo.

a día de hoy, se asume como hipótesis la existencia de suficientes puntos de recarga para los VE demandantes, no considerando la posibilidad de esperas para la recarga. Hipótesis seguida en la elaboración del modelo presentado en este trabajo detallado en los capítulos 3 y 4.

A fin de ajustarse en mayor medida a la realidad, se habría de considerar en el modelo de demanda una cierta limitación de puntos de recarga. En este sentido, se puede utilizar un modelo de colas [38] en el cual el tiempo de recarga sigue una distribución exponencial en la que se tienen en consideración el tiempo entre llegadas, el tiempo de servicio y la potencia máxima de carga del VE. En [39] se desarrolla un modelo de demanda de potencia asociada a VE como nudos PQ con características estocásticas, inspirándose en un modelo de colas. Así no solo se tendrá en cuenta en el modelo el tiempo de recarga de cada VE sino también el tiempo estimado de espera de cada uno de ellos para ser cargados.

2.2 LA MOVILIDAD URBANA

Todos los días, prácticamente a todas horas y para casi cualquier actividad los ciudadanos han de desplazarse por la ciudad o acceder a ella, lo que conlleva millones de desplazamientos diarios. La movilidad es, como deseo o necesidad de las personas de moverse, un derecho social que se ha de preservar y garantizar. Pero la contaminación, el ruido, los atascos y sus pérdidas de tiempo asociadas, así como el despilfarro energético y las enfermedades relacionadas con las concentraciones de contaminantes en el aire, entre otras, hacen que su preservación se vea en peligro según el avance y desarrollo que vive la sociedad. Las zonas urbanas desempeñan un papel importante en el cumplimiento de los objetivos de la Estrategia de la Unión Europea para un desarrollo sostenible, y es por ello que las ciudades de todo el mundo están incorporando criterios de sostenibilidad que equilibren necesidades de movilidad con accesibilidad, que economicen tiempo y energía y que preserven el medio ambiente. Es decir, se está llevando a cabo una transición hacia un modelo de movilidad urbana sostenible.

Si bien es verdad que el término movilidad no se reduce solo al transporte, este tiene una gran influencia. Es en este sentido que los VEs pueden jugar un papel fundamental en el nuevo modelo de movilidad, gracias a las ventajas que aporta en temas de ahorro energético y emisiones de ruido y gases contaminantes durante su circulación. Además, gracias a sus

características técnicas y constructivas, este tipo de vehículo se adapta a la perfección al ámbito urbano caracterizado por desplazamientos cortos, numerosas paradas y arrancadas y velocidades permitidas bajas.

Según la primera ley promulgada por el estado español sobre movilidad, la Ley 9/2003 de la Movilidad de la Generalitat de Cataluña, se entiende por esta al “conjunto de desplazamientos que las personas y los bienes deben hacer por motivo laboral, formativo, sanitario, social, cultural o de ocio, o por cualquier otro”. Se centra por tanto en la forma de desplazamiento, en conocer cómo se mueven las personas [40].

Las actuales áreas metropolitanas muestran un escenario caracterizado por una tendencia de movilidad intensiva y un uso del territorio extensivo. Esto es, una movilidad y velocidad de desplazamientos crecientes y una capacidad de cubrir mayores distancia de desplazamientos y multiplicar espacios donde poder vivir. Esta movilidad más intensiva además supone la modificación del modelo tradicional de movilidad, desde la denominada “movilidad de masa” concentrada según motivos (trabajo y estudios), dirección de los flujos (periferia-centro) o en dimensión temporal (horas pico y valle) a una denominada “movilidad singular”, que diversifica motivos, flujos o distribución horaria de los mismos. Estos cambios introducidos afectan tanto al volumen de desplazamientos como a su distancia y al tiempo dedicado a los mismos, además de al medio de transporte utilizado. En relación a esto último, es claro el crecimiento de la movilidad en coche, motivada por el aumento del número de desplazamientos y de las distancias asociadas a estos, al tratarse de un medio de transporte más flexible y con adaptación más óptima al nuevo modelo.

En las ciudades actuales se está viviendo un complejo proceso de reorganización territorial, destacando la descentralización de empleo y actividades y la dispersión de la población, que afecta profundamente a la movilidad. También cobra interés especial en los temas de movilidad la variable temporal, siendo fundamental la distribución temporal de los desplazamientos así como el tiempo que la población le dedica a los mismos. A pesar de los incrementos de velocidad en desplazamientos, debidos a las mejoras en los medios de transporte, el tiempo dedicado a los mismos no se ve ni mucho menos reducido. La reducción de tiempo que puede suponer el aumento de velocidad, se ve compensada por el incremento en distancias recorridas y número de viajes realizado. Con todo esto, la distribución espacial de los usuarios, que representarán las cargas, y la distribución temporal de los desplazamientos, profundamente relacionada con los

motivos de estos, son factores fundamentales en la implementación del modelo de demanda objeto de este trabajo.

Todos los cambios hasta aquí señalados guían hacia un modelo de movilidad no sostenible, presentando claros problemas ambientales, económicos y de equidad social. Es por esto que, tanto a nivel mundial como más concretamente a nivel europeo, se está dando especial importancia a la elaboración e implantación de Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) que aseguren el equilibrio entre necesidades de movilidad y accesibilidad, a la vez que se favorece la protección del medio ambiente, el desarrollo económico y la cohesión social [41], ofreciendo a los ciudadanos una mejor calidad de vida. Esto pasa por proporcionar a la ciudadanía alternativas al VCI privado cada vez más eficaces, confortables y sostenibles así como concienciar a la sociedad de la necesidad de un uso más eficiente del vehículo privado.

Para hacer posible este camino hacia una movilidad sostenible, con la adaptación de infraestructuras que esto pueda conllevar o la construcción de nuevas, la introducción de nuevos medios de transporte y la implantación de normativas que lo regulen, junto con el cambio en el comportamiento y hábitos de los ciudadanos, es necesaria una buena caracterización del transporte en las zonas metropolitanas y es en este sentido que en casi la totalidad de los países se realizan encuestas de movilidad urbana, para la recogida de datos y la realización de estudios con los que se elaboran bases de datos locales y nacionales.

Es clara la fuerte influencia que la movilidad urbana tiene en la demanda de energía eléctrica asociada a los VE y cuya simulación es objetivo de este trabajo. Así pues, el estudio y selección de los parámetros, así como la recogida de datos relativos a este tema es parte fundamental del mismo. Debido a la falta de datos y estudios estadísticos específicos para movilidad con VE, se tomará a lo largo de este trabajo la hipótesis de que el comportamiento de los usuarios de VE será muy similar al de los usuarios de VCI actual, tomando los datos y estadísticas de movilidad disponibles para este último campo.

EL ESTADO DEL ARTE DE LA MOVILIDAD URBANA

Los datos relativos a la movilidad urbana son extraídos fundamentalmente de bases de datos locales y de los datos y estudios aportados por los diferentes departamentos o consorcios de transportes. Estos serán los que condicionen en mayor medida el modelo creado, es decir, los

resultados obtenidos con el modelo desarrollado dependerán de los valores de movilidad usados, que a su vez dependerán de la base de datos de la que se extraigan.

En España destaca el Observatorio de la Movilidad Metropolitana (OMM) [41], una iniciativa a nivel nacional de análisis y reflexión constituida por las Autoridades de Transporte Público (ATP) que publica anualmente un informe de análisis sobre movilidad de las áreas metropolitanas. También destacan las encuestas de movilidad elaboradas por las diferentes comunidades autónomas, como las Encuestas de Movilidad Cotidiana (EMQ, Enquesta de Mobilitat Quotidiana) [46], aportadas por la Autoridad del Transporte Metropolitano del Área de Barcelona (ATM, Autoritat del Transport Metropolità)[43].

Las características de autonomía, comportamiento ante paradas-arrancadas frecuentes de alto rendimiento y niveles de contaminación y emisiones relativos a su movilidad, hacen al VE una opción de movilidad perfecta para un entorno urbano. Este trabajo se centra en la movilidad de usuarios residentes en la comunidad que se quiera estudiar, pero focalizar la atención solo en los desplazamientos que tales usuarios realizan en la zona central de su ciudad de residencia resta excesivo realismo a asunto. A todo usuario que haga uso de un VE para moverse por el centro de su ciudad le puede surgir a necesidad de desplazarse a la periferia de la misma, incluso a diario y varias veces en un día. De hecho, este tipo de desplazamiento, los que van desde el centro hacia la periferia y viceversa se han visto incrementados en los últimos años, como se puede ver en *inverse commuting* o *reverse commuting* [44]. Siguiendo esto, y con el ánimo de lograr la máxima proximidad a la realidad posible, en este trabajo se hace distinción entre dos tipos de desplazamiento que el usuario residente puede realizar, en función de la longitud, que se han denominado: desplazamientos internos, con cobertura de la zona centro y barrios de los alrededores, y desplazamientos externos, que cubren los pueblos de la periferia. Este aspecto aparece más detallado en esta memoria en la descripción del modelo implementado.

2.3 EL CONSUMO ENERGÉTICO Y LA DEMANDA ELÉCTRICA

Todo trabajo realizado lleva implícito un consumo de energía. Por supuesto este principio es aplicable a cualquier máquina y en dicho consumo energético no solo se incluye la energía necesaria para la realización del trabajo como tal, se ha de tener en cuenta una cantidad extra de energía que supla las pérdidas asociadas a los rendimientos de cada máquina o tecnología. En el caso particular de los vehículos, su tracción corre fundamentalmente a cargo de un motor que, como máquina que es, requiere de un suministro continuo de energía para la realización del trabajo de tracción necesario para el movimiento del vehículo. En el caso de los VCI dicho suministro energético corre a cargo del combustible de origen fósil almacenado en su depósito mientras que en el del VE proviene la electricidad, energía generada y almacenada de muy diversas formas.

A lo largo de esta memoria se han defendido las ventajas asociadas al VE en temas de eficiencia y consumo energético. A continuación se pretende demostrar lo afirmado mediante una comparativa a nivel de eficiencia y consumo energético entre las tecnologías de VCI y de VE. Para aportar una idea sencilla de estos aspectos, decir que con un repostaje de 50 litros de gasolina se están acumulando en el depósito en torno a unos 500kWh en forma de energía química de los cuales tan solo 125kWh serán aprovechables para la movilidad del vehículo, al cifrarse el rendimiento de los motores de gasolina en torno al 25%. En el caso de que la propulsión del vehículo corriese a cargo de un motor eléctrico, dicho rendimiento ascendería a un 85-90%, lo cual reduciría muy significativamente la cantidad de energía eléctrica con la que la batería habría de abastecer al motor para lograr esos 125kWh en tracción. Conviene dejar claro que no es lo mismo la eficiencia del motor que la eficiencia global del vehículo. Por ejemplo, en el caso del VE la eficiencia del motor, como se ha dicho, es de entorno al 90% mientras que la eficiencia del conjunto del vehículo es de un 65-75% (Tank-to-Wheel Efficiency). Si además se tienen en cuenta las pérdidas estimadas en cada transformación de la energía, desde su generación hasta que llega al vehículo, además de las producidas dentro del propio vehículo, la eficiencia se reduce a un 25-30% (Well-to-Wheel Efficiency), la cual en el caso del VCI se cifra en un 12-17%. En la Tabla 1 se puede apreciar una comparativa de los diferentes ratios de eficiencia para VCI y VE, en función de la porción considerada.

	VCI	VE
WELL-TO-TANK	83%	38%
TANK-TO-WHEEL	20-25%	65-70%
WELL-TO-WHEEL	12-17%	25-30%

Tabla 1. Comparativa eficiencias VCI gasolina y diésel y VE. Análisis Well-to-Tank, Tank-to-Wheel y Well-to-Wheel.

Para aportar una idea más clara, a continuación se cuantifican los consumos asociados a coches de combustión y de coches eléctricos. En un juicio totalmente equitativo, los consumos de ambas tecnologías se habrían de evaluar con el mismo coche pero con distintos motores, uno de combustión y otro eléctrico. Esto como tal es difícil pero existen en el mercado algunos modelos de vehículos que cuentan con ambas versiones y prestaciones muy similares, como es el caso de Renault Fluence de gasolina o diésel y el Renault Fluence Z.E. eléctrico. En un estudio realizado de la cantidad de energía que consume cada uno de ellos para circular 100km [45], teniendo en cuenta que las prestaciones son altamente similares a diferencia de que el modelo eléctrico cuenta con un peso de 300kg superior, se han alcanzado los resultados indicados en la Tabla 2.

	CONSUMO	CONSUMO [MJ/100km]
RENAULT FLUENCE GASOLINA	7.6 l/100km	254.57 MJ/100km
RENAULT FLUENCE DIÉSEL	5.7 l/100km	212.40 MJ/100km
RENAULT FLUENCE ELÉCTRICO	18.5 kWh/100km	66.6 MJ/100km

Tabla 2. Comparativa consumos VCI gasolina y diésel y VE.

Se puede afirmar que, a pesar de la exigencia extra que le supone al eléctrico el mover esos 300kg más de peso, este consume entre 3.67 y 3.97 veces menos que el de gasolina y entre 3.07 y 3.31 veces menos que la versión diésel. Queda patente que un VE consume una cuarta parte de energía que un VCI con motor gasolina y una tercera parte de lo que consume un VCI con motor diésel.

Pero no solo en la porción Tank-to-Wheel (tanque-rueda) el VE resulta ampliamente ventajoso en términos de eficiencia energética. Aún situando el análisis en el caso más desfavorable, aquel en el que la generación eléctrica proviene de la quema de carbón, el VE supera con creces en eficiencia el VCI, llegando incluso a duplicarla según ciertos estudios como el llevado a cabo por Transport & Environment en asociación con Friends of the Earth Europe y Greenpeace European Unit denominado “Green Power for the Electric Car” en enero de 2010 [46].

Además de esta mejora en materia de eficiencia energética, el VE permite una reducción significativa de la contaminación y puede llegar a convertirse en un aliado para el sistema eléctrico, permitiéndole operar más eficientemente y facilitando la integración de las ER. Pero para que esto se cumpla se requiere del desarrollo de un sistema de gestión de recarga inteligente. Es decir, un sistema con el que se logre que la mayor parte de la electricidad con la que se alimenten estos vehículos provenga de fuentes de ER, no emisoras de GEI, y que los procesos de recarga contribuyan al aplanamiento de la curva de demanda, por medio de recargas en horas valle, y llegando incluso a permitir que el coche eléctrico se convierta en un sistema reversible de almacenamiento distribuido de energía, cargándose las baterías de los mismos en momentos de exceso de generación proveniente de fuentes de alta variabilidad como son las ER, o utilizándose dichas batería como suministro en momento de exceso de demanda.

A fin de poder conocer los retos que la implementación de la tecnología de VE puede suponer y saber si se posee la capacidad suficiente para hacerles frente o simplemente cómo enfrentarlos, son necesario tanto la elaboración de estudios enfocados a la estimación de la demanda asociada a esta nueva tecnología de movilidad, como nueva carga de la red, como el conocimiento del terreno en el que se trabaja, es decir, conocer qué es y cómo opera el sector eléctrico y cómo se genera, distribuye y transporta esa energía de la cual depende este nuevo tipo de movilidad. Siguiendo este razonamiento, en el presente apartado se exponen el estado del arte en materia de demanda, modelos de demanda y técnicas de estimación de la misma. Además se aporta una breve visión acerca de la energía eléctrica y del sector eléctrico y su funcionamiento. Para finalizar este apartado se ha incluido análisis acerca de la integración de VE y el impacto que esta puede conllevar en la sociedad actual.

Como se sabe, queda fuera del alcance del presente proyecto la introducción del modelo elaborado en una red de distribución y la evaluación del impacto estimado que la comunidad de VE estudiada tendría en la citada red correspondiente. Por esta razón, no se realiza aquí un cálculo detallado de los flujos de potencia y del impacto de la carga de VEs sobre la misma. Pero debido a la relación con el tema y la importancia que, se considera, tiene el conocimiento de estos aspectos, se añaden unas consideraciones generales sobre el sistema eléctrico español, su composición y funcionamiento así como su estructura de generación al final de la presente memoria, como Anexo en la página 167.

2.3.1 ESTADO DEL ARTE DE LA DEMANDA ELÉCTRICA Y LOS MODELOS DE DEMANDA

Debido a la crucial importancia que tiene en la sociedad actual, la predicción de demanda eléctrica ha sido objeto de muchos estudios y análisis. Así pues es normal que a día de hoy existan multitud de métodos y técnicas diferentes que permitan la obtención de modelos aproximados de consumo eléctrico, tanto para demanda eléctrica convencional, a nivel doméstico, industrial e incluso de movilidad bajo tecnología de VE, como es el caso de este trabajo. Estos incluyen métodos ingenieriles basados en el uso de principios físicos, métodos estadísticos y métodos de inteligencia artificial, destacando aquí las redes neuronales (Artificial Neural Networks, ANNs) y las máquinas de soporte vectorial (Support Vector Machines, SVMs). En 2003 Krarti en [47] aportó un estudio general acerca de los métodos basados en inteligencia artificial y su aplicación a los sistemas de energía en edificios. En [48], Dounis presento en 2010 un estudio similar al de Krarti en 2003. También existes algunos métodos híbridos, es decir, combinación de diferentes métodos de los anteriormente expuestos, buscando la optimización de los modelos representados [49]. Diversos estudios, como [50, 51, 52, 53], se centra en esta combinación de técnicas para simulación de demanda y consumos energéticos.

2.3.1.1 MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Los modelos de regresión estadísticos se basan en la simple correlación del consumo energético con ciertas variables de influencia, específicas para el caso de estudio. Son modelos empíricos desarrollados a partir de datos históricos y cuyo funcionamiento necesita del aporte de los mismos, haciendo del todo necesaria la recogida de datos suficientes a través de experimentos reales antes de la implementación de los modelos desarrollados bajo esta técnica. Siguiendo esta metodología, destacan diferentes técnicas como el modelo ARX (Auto-Regressive model with eXtra inputs) [54], desarrollado por MJ Jiménez y MR Heras en 2005, o las series temporales ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average) [55], donde Kimbara et al. Proponen un modelo para poner en práctica la predicción en línea o modelos lineales, el cual se basa en la utilización de datos de demanda pasados con los que elaborar previsiones de demanda futuras. Un paso más allá van Hoffman [56] y Newsham y Birt [57], al utilizar series ARIMA con entradas eXternas (ARIMAX, ARIMA with eXternal inputs) aplicadas a usos como la predicción y el control de demanda eléctrica en edificios. En [57] se pone especial énfasis en la influencia de la ocupación, lo cual parece aumentar la exactitud del modelo.

2.3.1.2 REDES NEURONALES

Las redes neuronales o ANNs son los modelos de inteligencia artificial más extensamente usados en aplicaciones de predicción de consumo energético. Este tipo de modelo funciona muy bien para la resolución de problemas no lineales y presenta una gran exactitud simulando modelos complejos reales.

Como se ha mencionado, se puede recurrir a la combinación de varias de estas técnicas con el objetivo de mejorar la precisión de los resultados obtenidos. Este es el caso de [52], donde Karatasou et al. introduce una serie de procedimientos estadísticos en el modelo de red neuronal implementado obteniendo unos resultados comparablemente mejores que los de estudios similares que no hacían uso de ellos.

Existen diversos estudios centrados en el análisis comparativo de las diferentes técnicas de modelado conocidas, de forma tal que se pueda conocer cual funciona mejor para dependiendo qué aplicaciones. En esta línea Azadeh et al. [58] realizan una comparativa entre las redes neuronales y los modelos estadísticos, demostrando la mayor eficiencia de las primeras en casos donde el consumo energético presenta elevadas fluctuaciones.

Por su parte, los SVMs son cada vez más usados en la investigación y la industria. Estos modelos son sumamente eficaces en la solución de problemas no lineales, aun cuando las cantidades de datos entregados son pequeñas.

2.3.1.3 DEMANDA ASOCIADA A LA TECNOLOGÍA DE VE

Focalizando más el asunto en los modelos de demanda eléctrica de los VE, tras el proceso de documentación llevado a cabo para la realización del presente trabajo, se concluye que las técnicas más usadas y desarrolladas para este fin son los modelos basados en agentes, centrados principalmente en cada individuo interviniente en la comunidad, o los modelos estadísticos basados en valores promedio, con una visión más global de la comunidad. Tras el análisis y valoración de los distintos procedimientos existentes para la elaboración de previsiones de demanda, en este trabajo se ha optado por la técnica de simulación basada en agentes para la implementación del modelo desarrollado.

La simulación basada en agentes se centra en los componentes básicos del sistema, llevándose a cabo el proceso de abstracción sobre cada componente básico individualmente. De esta

manera, para la construcción del sistema se ha de identificar cada uno de los componentes del sistema real y las interacciones que se producen entre ellos. No se imponen condiciones sobre el comportamiento global del sistema sino que es este el que emerge según las condiciones impuestas sobre los componentes básicos del mismo o al entorno [59]. Además este tipo de modelado se hace especialmente interesante en aquellos escenarios con elevada influencia del espacio geográfico.

En cuanto a los valores introducidos al sistema, hay estudios que se decanta por realizar aproximaciones deterministas utilizando valores promedios mientras que otros recurren a la introducción de variables en los propios parámetros. La opción mayoritaria es decantarse por la elaboración de un estudio determinista, de manera que las mismas entradas producirán de manera invariable las mismas salidas sin contemplar aleatoriedad o principio de incertidumbre alguno. Esto, de cara a tratar la simulación de sistemas reales, como es el caso, hace perder realismo en exceso y limitar mucho el campo de posibilidades que se tienen en consideración en la simulación. Para tener en cuenta el carácter estocástico característico de aspectos como la movilidad, el consumo eléctrico y el comportamiento de usuarios en una comunidad, se recurre a la introducción de la técnica Monte Carlo en el modelo simulado. Así se podrá caracterizar la sucesión de variables aleatorias o estocásticas que evolucionan en función de la variable tiempo.

Actualmente existen propuestas de mayor complejidad pero mayor realismo a su vez, de las cuales no se hace uso en este trabajo. Son las que hacen uso de la teoría de juego, en las que mediante el estudio de las estrategias óptimas junto con comportamientos previstos y observados se llevan a cabo los procesos de decisión, estudiados en entornos en los que existen interacción entre los componentes del propio sistema.

2.3.2 EL SECTOR ELÉCTRICO

Una de las grandes ventajas que ofrece la electricidad es la gran versatilidad de fuentes y formas de generación que presenta, en contra se tiene la imposibilidad de almacenamiento a gran escala de la misma. Esto hace que sea sumamente importante la coordinación técnica que asegure que producción y demanda coincidan en todo momento, lo que conlleva además la coordinación de las distintas formas de generación. A esto se le suma, debido al papel

fundamental que juega la electricidad en la sociedad, la vital importancia de garantizar en todo momento la seguridad y continuidad del suministro eléctrico.

El sector eléctrico comprende todo el conjunto de actividades necesarias que garanticen el abastecimiento de energía eléctrica a todos y cada uno de los usuarios finales en todos y cada uno de los puntos en que esta sea requerida. Tal abastecimiento se lleva a cabo a través de las redes eléctricas, cuya operación y gestión corre a cargo de dos agentes: el Operador del Sistema de Transporte (TSO, Transmission System Operator) y el Operador del Sistema de Distribución (DSO, Distribution System Operator).

El transporte consiste en la conducción de la electricidad en Alta Tensión (AT), a 400 y 220kV, desde los centros de generación hasta las redes de distribución. La distribución, por su parte, enlaza las subestaciones de AT con los puntos de consumo, operando en niveles de Alta, Media y Baja Tensión, en función de la cercanía al punto de consumo.

Para garantizar el suministro de energía eléctrica, se elaboran con carácter diario previsiones de curvas de demanda, que son corregidas constantemente a lo largo del día en función del consumo real presentado. Son muchos y muy variados los aspectos que se han de tener en cuenta en tales previsiones, dependiendo fuertemente estos de la clase de demanda que se esté estudiando. Para la demanda objetivo de análisis en este trabajo, por ejemplo, cobran especial importancia los hábitos de movilidad de la zona de estudio en la cual se implemente la comunidad de VE, las distancias y duraciones de trayectos así como los modelos y el número de VE que intervengan en dicha comunidad.

Puede concluirse pues que es de vital importancia para el abastecimiento de la energía eléctrica llevar a cabo una estimación del consumo, sea cual sea el ámbito en el cual se desarrolle el mismo. Es este uno de los pilares que motiva la elaboración del modelo presentado en esta memoria, de manera que se ayude al desarrollo e implementación de esta alternativa de movilidad mediante la aportación de una idea del consumo que puede llevar asociada una comunidad de VE en el ámbito de movilidad urbana.

Como se ha mencionado, al final de la presente memoria se incluye una exposición más detallada del sector eléctrico en su conjunto, de las actividades de generación y las redes eléctrica así como un análisis en mayor profundidad de cómo opera el sistema eléctrico en España en la actualidad.

2.3.3 INTEGRACION DEL VE

La integración del VE es a día de hoy una fuente total de incertidumbres. Dependiendo de la fuente consultada, unos afirman que el desarrollo e implementación del VE será un proceso lento y progresivo, mientras que otros apuestan por un desarrollo rápido y una implementación inmediata en un futuro muy próximo. Lo que está claro es que los VE enchufables, bien aquellos 100% eléctricos bien los híbridos enchufables, tienen una altísima probabilidad de éxito en la sociedad del futuro y un significativo impacto en los sistemas eléctricos a nivel mundial. Es ya una realidad la apuesta por la electrificación del transporte que hacen las distintas instituciones, tanto a nivel continental, nacional como local. Lo cierto es que esta nueva tecnología de transporte presenta grandes desafíos, pero también una amplia gama de oportunidades. Tal impacto en los sistemas eléctricos de todo el mundo, asociado a la adopción masiva de VE, hace necesario prestar especial atención a la seguridad y estabilidad del sistema.

Como responsables de los sistemas eléctricos de cada país que son, los operadores del sistema tienen una gran responsabilidad en este sentido. Con el fin de afrontar este nuevo desafío, algunos miembros de la Asociación de Operadores de Grandes Redes Eléctricas (VLPGO, Very Large Power Grid Operations¹²) [61, 62] pusieron en marcha en 2009 un proyecto conjunto sobre vehículo eléctrico enchufable que se centra en el análisis de los efectos que este tendrá en la operación del sistema. No solo buscan la elaboración de planes de actuación propios, sino que además aportan recomendaciones a los constructores de automóviles y a los entes regulatorios, todo bajo el objetivo de evitar efectos adversos en la seguridad de suministro y permitir un uso más eficiente de la infraestructura eléctrica existente, así como de beneficiar a los usuarios.

También en este sentido, en España, se ha creado la figura de un nuevo agente, el Gestor de Carga, encargado de coordinar la carga de VE. Mediante el Real Decreto 647/2011, de 9 de mayo [17], se define la actividad de estos consistente en la realización de los servicios de recarga energética para VE. Este agente está autorizado para la compra y venta de energía eléctrica destinada a la recarga de VE, haciendo de intermediario entre los operadores de los sistemas de transporte y distribución, del mercado eléctrico y de los usuarios de VE.

¹² La VLPGO es una asociación creada por los mayores operadores de redes eléctricas, por iniciativa voluntaria. Tales redes representan más del 60% de la electricidad demandada en todo el planeta. Todos los participantes de esta iniciativa comparten el compromiso de dirigir y expandir la transición del sector eléctrico hacia el sistema eléctrico del siglo XXI. [REE: "Respuestas de los TSO al vehículo eléctrico" disponible en www.ree.es/red21/vehiculo-electrico].

De acuerdo con los estudios elaborados por la Agencia Internacional de la Energía (IEA de sus siglas en inglés), se prevé una implantación masiva del VE a nivel mundial para el año 2050. En ellos se cifran las ventas de vehículos eléctricos puros e híbridos enchufables en torno a los 100 millones de unidades para ese año, y cuya evolución prevista se puede ver en la Imagen 4.

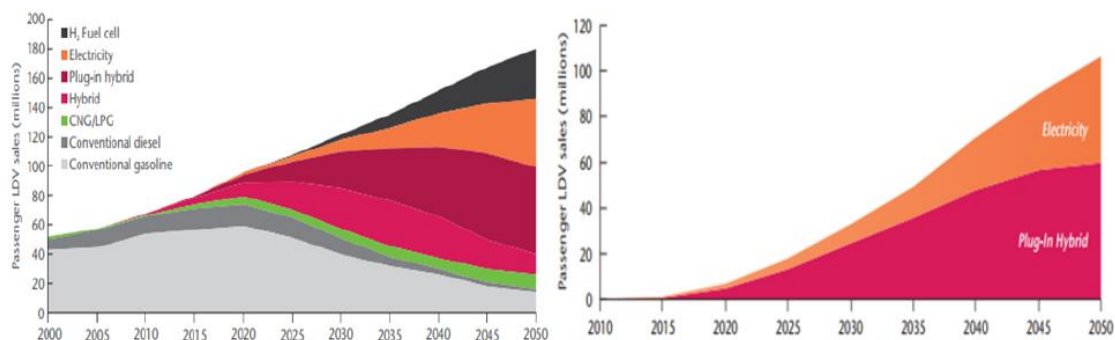


Imagen 4. Comparativa ventas anuales previstas de vehículo ligero y ventas anuales de VE (BEV Y PHEV). Escenario Blue Map 2000-2050 [34].

2.3.3.1 INFLUENCIA DE LAS ESTRATEGIAS DE CARGA EN EL IMPACTO DEL VE

En cuanto a la afección de los VE a la red, esta va a depender en gran medida de la estrategia y el control de carga de las baterías que se adopte. Siguiendo esta línea y con el objetivo de poder comprobar las conclusiones extraídas de los estudios analizados, que se desarrollan a lo largo de este apartado, en este trabajo se ha decidido el desarrollo del modelos de simulación de demanda asociada a una comunidad específica para tres estrategias de carga diferentes. Es decir, se toma el mismo modelo y se le somete a los mismo datos de entrada, que caractericen la comunidad objeto de estudio, los modelos de VE que en ella interviene y la infraestructura de recarga propia de la misma, pero introduciendo en el algoritmo de programación ciertas modificaciones, con las cuales lograr la asunción de diferentes hábitos y decisiones de carga por parte de los usuarios participantes. Una vez implementado se extraen y analizan los resultados, lo cual permite una comprobación de la elevada influencia de la estrategia de carga seguida por los consumidores en la integración de los VEs en la sociedad. Se explica este aspecto en mayor detalle en el capítulo 4, tras la implementación del modelo desarrollado.

Principalmente se diferencia entre carga lenta y carga rápida. Una carga lenta es la que menos potencia exigiría a la red, en tono a 4kW que viene a ser la potencia media contratada en los

hogares españoles, pero la que más tiempo requiere, aproximadamente de 5 a 8 horas, para una recarga completa. En caso de que la elección sea una carga rápida, la potencia requerida a la red será mucho mayor, unos 50kW, a cambio de una reducción significativa en el tiempo de conexión necesario, un intervalo de 10 a 30 minutos para un porcentaje de recarga del 20 al 80%. Aún a pesar de que la potencia requerida por el VE a la red en una carga lenta no sea excesivamente elevada, si la gran mayoría de los usuarios de VE opta por conectar su vehículo en la misma franja horaria, la recarga supondría hacer uso de gran cantidad la potencia total instalada e implementar el consiguiente refuerzo de las redes de transporte y distribución que esto implicaría. Es decir, se vería afectado el funcionamiento normal del sistema y se requeriría de la realización de inversiones para la ampliación y refuerzo del mismo, a lo que se le sumaría la necesidad de hacer entrar en funcionamiento centrales de generación eléctrica de menor eficiencia y mayor coste.

Así pues, la carga de los VE en periodos de picos de demanda supondría una sobrecarga de la infraestructura durante intervalos breves de tiempo, resultando en una menor eficiencia en el sistema eléctrico y en una necesidad de aumentar tal infraestructura de generación, transporte y distribución, junto con un aumento en las emisiones de CO₂. Por el contrario, si se opta por una estrategia de carga controlada los VE pueden suponer una oportunidad para aumentar la eficiencia del sistemas, además de suponer una reducción de costes de movilidad, una mayor integración de las ER y un descenso significativo de las emisiones de CO₂, junto con la reducción de la dependencia energética del exterior.

Se hace patente la necesidad de implementar una “recarga inteligente”, es decir, un sistema que permita la gestión del tiempo y potencia de carga por parte del usuario de VE y otros agentes del sistema eléctrico, que posibilite beneficiarse de las oportunidades que este ofrece. Se ha de hacer coincidir las horas de carga de los VE con las necesidades del sistema y para ello se conocen, principalmente, tres métodos [61]: unas reglas predeterminadas, un control directo de la carga y señales de precio.

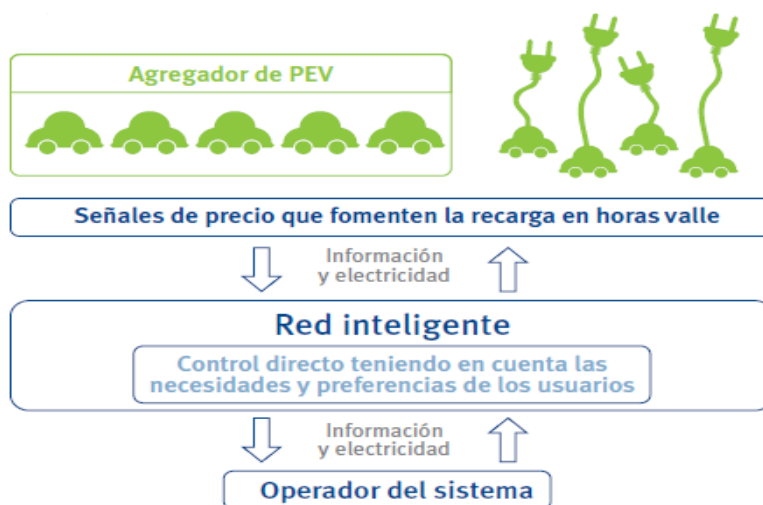


Imagen 5. Recarga Inteligente. Red Eléctrica de España (REE) [75].

2.3.3.2 EL VE COMO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DISTRIBUIDO

Otro aspecto muy interesante a tener en cuenta es la posibilidad de utilizar las comunidades de VE como sistemas de almacenamiento distribuido para la energía eléctrica. Pero para que esto llegue a ser posible, las redes habrían de permitir un flujo bidireccional de electricidad entre el VE y el sistema, entrando así al concepto V2G o Vehicle to Grid y en enlazando con el de Smart Grid. Este último se presenta en mayor profundidad en el anexo sobre sistema eléctrico incluido al final de la memoria.

En este concepto de almacenamiento distribuido, donde las baterías de los vehículos proporcionan servicio auxiliar a la red eléctrica, la idea fundamental es poner a disposición del mercado eléctrico la capacidad y la energía almacenada en los VE estacionados. Si se tiene en cuenta el alto porcentaje de horas al día que los vehículos se encuentran estacionados, la disponibilidad de esta capacidad podría ser muy elevada aún a pesar de la suma dependencia de la movilidad del usuario. Con este sistema, además, se estaría posibilitando la participación de los usuarios de VE en la operación del sistema, incrementando la seguridad de suministro en horas punta. Esta capacidad requerirá de la implantación de sistema de comunicación bidireccional entre los usuarios y el operador del sistema [62]. Así mismo y de manera independiente al estado del sistema, los VE pueden ofrecer servicios de control de tensión y frecuencia aprovechables por las compañías distribuidoras.

A pesar de los claros beneficios que los sistemas V2G pueden reportar, existen serios desafíos que superar para su implementación [63, 64]. Los flujos de potencia bidireccionales conllevan una mayor degradación de las baterías, debido al aumento de frecuencia de los ciclos; un mayor coste de los cargadores, debido a la mayor complejidad electrónica de los mismos que permita este flujo de potencia bidireccional; y las adecuaciones correspondientes necesarias en los sistemas de distribución [65]. Requiere del desarrollo de softwares que garanticen a los usuarios que el estado de carga de la batería de su VE será el adecuado cuando se requiera su utilización, así como de medidas de seguridad adicionales [65, 66].

Aun considerando los inconvenientes que puede presentar un sistema V2G, se puede concluir que, haciendo uso de la recarga inteligente, la implantación de tecnología de VE en la sociedad no tiene por qué exigir nuevas inversiones para la ampliación de la red de distribución y transporte, basta con adaptar esta para el flujo bidireccional. Se podría incluso reducir la necesidad de refuerzos y ampliaciones en la red de cara a posibles aumentos de demanda eléctrica ordinaria, importante ya que aún a pesar de que en estos años esta se esté viendo disminuida, al deberse esto a la crisis económica se prevé que en unos años cambie la tendencia.

CAPÍTULO 3. MODELO ESTOCÁTICO DE SIMULACIÓN DE LA DEMANDA DE UNA POBLACIÓN DE VE

Como se ha venido mencionando en diversas ocasiones a lo largo de esta memoria, este trabajo está centrado en la elaboración de un modelo de simulación que permita estimar los flujos de potencia de una comunidad de VE. Con ello se busca poder modelar la demanda asociada a la misma y evaluarse el impacto que esta nueva tecnología puede tener en el sistema eléctrico actual. Esto último queda fuera del alcance de este trabajo, pero se deja abierta la puerta a la utilización e introducción de los datos reportados por este modelo, en un modelo de red de distribución eléctrica para evaluar dicho impacto.

En el presente capítulo se expone la metodología utilizada para la elaboración del modelo y se describen tanto los datos que utiliza el mismo, como los resultados que generaría con esos datos. A grandes rasgos se puede decir que el modelo calcula el consumo asociado a cada desplazamiento realizado por cada usuario de VE perteneciente a la comunidad objeto de estudio, teniendo en cuenta diferentes tipos de usuarios y sus diferentes necesidades de movilidad y modelos de VE utilizados. De este modo es posible obtener el consumo eléctrico por horas de la citada comunidad y elaborarse con él una curva horaria de consumo, similar a las elaboradas por los TSO de los sistemas eléctricos para la estimación de la demanda convencional. Se aporta así una comparativa, visual y sencilla de interpretar, entre las horas pico y horas valle de ambas demandas y cantidades de energía eléctrica solicitadas a la red, pudiéndose formar una primera idea de las dimensiones del impacto o de las posibilidades que esta nueva solicitud puede aportar a la red.

A falta de datos reales que implementar en un modelo fijo para la obtención de los resultados de consumos deseados, se ha optado por la elaboración de un modelo de marcado carácter probabilístico. Es decir, se parte de una serie de datos estadísticos tomados de bases de datos y se generan diferentes situaciones que se asemejen a las necesidades de los futuros usuarios. Así pues, primeramente se elabora un perfil de movilidad para cada usuario de la comunidad, a lo largo de todo el periodo de tiempo simulado. Para ello se tienen en cuenta variables de movilidad tales como motivo, longitud, duración y fin de cada desplazamiento, en función del

tipo de usuario que se esté considerando. Una vez se conocen las características de movilidad se puede iniciar el cálculo de los consumos, en el que interviene un nuevo conjunto de variables, las del VE. Entre estas, cobran especial importancia la capacidad de la batería de la que hace uso el modelo de VE en cuestión y el consumo del mismo. El cálculo de consumo va íntimamente ligado al perfil de carga, definido por el número de cargas realizadas y la duración de las mismas, así como el modo de carga elegido por el usuario. Interviniendo en este punto el tercer conjunto de variables consideradas, las asociadas a la carga, como son la tensión y corriente a la cual se va a realizar dicha carga. Estas determinarán la potencia administrada por el punto de carga al vehículo por unidad de tiempo, así como el tiempo necesario para la realización de la misma. Además de los citados parámetros técnicos, el cálculo del consumo eléctrico asociado a la comunidad se ve altamente influenciado por la estrategia de carga seguida por los usuarios, que es algo que el presente modelo también tiene en cuenta mediante la implantación de diferentes perfiles de la misma para un mismo modelo de comunidad.

A continuación se detalla la metodología seguida para la definición de tales características y la simulación del modelo elaborado. Será en el siguiente capítulo cuando se aplique el modelo aquí descrito a un caso concreto, introduciendo datos estadísticos de usuarios reales y obteniendo resultados que serán interpretados.

3.1 METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DEL MODELO DE DEMANDA

Como se expuso en el apartado 2.3.4, existen muy diversos métodos para la simulación de sistemas complejos¹³ y, por extensión, para la predicción de la demanda energética, que van desde métodos ingenieriles y estadísticos hasta la inteligencia artificial. Puede afirmarse que en las últimas décadas han aparecido novedosas técnicas para el modelado de estos sistemas, particularmente para aquellos de carácter social. Entre estos cabe destacar dos técnicas muy usadas: el modelo basado en agentes y la dinámica de sistemas.

¹³ Se entiende por sistema complejo a un conjunto de elementos en interacción caracterizados por contar con una estructura organizada en varios niveles o jerarquías. Ejemplos de sistemas complejos son las economías, los ecosistemas y las sociedades pasando por los organismos pluricelulares, las colonias de hormigas, etc.

La dinámica de sistemas se focaliza en la causalidad circular o retroalimentación entre las variables observables, principalmente variables observables del sistema en su conjunto. Es decir, estudia dichas variables e intenta identificar las relaciones de causalidad que existen entre ellas. Así pues, esta técnica de modelado está centrada en la relación existente entre dichas variables, aún a pesar de la complejidad de muchas de ellas, que no están ligadas por relaciones lineales de causa-efecto.

Por su parte, el modelo basado en agentes se caracteriza por englobar varios agentes más o menos independientes, heterogéneos y autónomos, con metas y objetivos propios, capaces de interaccionar entre sí y con su entorno. En general, estos sistemas se caracterizan por la intervención de un número elevado de agentes, relativamente simples, con capacidad de evolución a lo largo del tiempo, adaptándose así a entornos y objetivos cambiantes. Estos factores hacen a esta técnica altamente interesante para el modelado de sistemas adaptativos, sistemas con componentes individuales heterogéneos y sistemas en los que el espacio geográfico puede ejercer una elevada influencia, todas ellas características que se pueden encontrar en sistemas como el que es objeto de simulación en este trabajo [59].

Así pues, para la elaboración del modelo usado en este trabajo se ha recurrido al método basado en agentes, considerándose así cada usuario como una entidad individual a ser analizada, al mismo tiempo que es capaz de interaccionar con las demás entidades que componen la comunidad y con el propio entorno. Además se registra la evolución del sistema, que en este caso corresponde a la evolución del estado de carga de las baterías de los VE, atendiendo a las diferentes necesidades y características de movilidad del usuario y las características del vehículo usado por el mismo.

Otra peculiaridad de los sistemas sociales, como el aquí tratado, es la alta mutabilidad del mismo con el tiempo y la inmensa variabilidad de situaciones que podrían darse. Por esta razón, para tratar de la manera más exacta y real posible estos sistemas, se ha de introducir en su simulación componentes probabilísticas y de aleatoriedad mediante la utilización de técnicas de tipo Monte Carlo, que permite tener en cuenta el carácter estocástico de estos sistemas, en lugar de recurrir a métodos deterministas. Para añadir más complejidad al asunto, se puede utilizar teoría de juegos, en la que se analizan tanto datos previstos u observados como con estrategias óptimas deducidas, aunque esta técnica no ha sido incluida en este trabajo.

3.2 DESARROLLO DEL MODELO DE DEMANDA

El objetivo del modelo simulado es la determinación de la potencia demandada por una comunidad de VE a una red de distribución a lo largo de un periodo de tiempo. Para hacer más fácil y realista la interpretación de los datos obtenidos, se fragmenta dicha demanda por horas y usuario, de manera tal que el sistema permite conocer el consumo de energía eléctrica que supone cada desplazamiento de cada usuario de la comunidad a cada hora del periodo considerado. Además se elabora un recuento por horas de la demanda total asociada a todos los usuarios, así como un recuento de demanda por usuario para todo el periodo simulado. Dicha demanda es dependiente de las diferentes necesidades de movilidad de las diferentes personas, así como de las características de las mismas y los vehículos de los que estas hacen uso. Se tiene en cuenta también el momento en el cual se está estudiando la citada demanda, haciendo distinción entre si el modelo se simula en periodo de fin de semana y/o festivo o entre semana.

El modelo elaborado en este trabajo centra la simulación en un solo día, fragmentando el análisis en 24 horas. Se ha considerado lo más adecuado acorde con el objetivo final de la simulación, ya que es el mismo periodo de tiempo que se usa para prever la demanda eléctrica convencional y ambas solicitudes se van a hacer a la misma red de distribución. Bien es cierto que el programa permite una fácil adaptación a un periodo distinto de simulación mediante una ligera transformación del algoritmo. De esta forma, solo cuenta con una variable de iniciación, el número de usuarios de VE que componen la comunidad objeto de estudio o número de VE que van a intervenir¹⁴, a definir en primer lugar. Seguidamente se ha de alimentar el programa con los valores de las variables que van a caracterizar la comunidad objeto, las variables dato. Estas aparecen claramente organizadas en tres grupos: variables dato de entrada de movilidad (o datos de movilidad), variables dato de entrada de VE (o datos de VE) y variables dato de entrada de carga (o datos de carga), especificadas en el esquema de la Imagen 6, junto con su utilización y la estructura general del programa, y detalladas más adelante. En azul pueden apreciarse todas las variables dato de entrada, tras los corchetes; en rosa, naranja y morado las matrices con los resultados de simulación específicos para cada usuario; y, por último, en verde todas las variables de salida, susceptibles de ser analizadas. Así mismo, en el Anexo I de la página 136, se incluye una tabla en la cual se detallan las mismas.

¹⁴ En todo momento se habla de usuarios de la comunidad pero conviene aclarar que cada usuario es un VE, es decir, se podría hablar de VE en sí. Se ha optado por el uso de la primera terminología debido a la gran influencia que variables de movilidad, asociadas plenamente al comportamiento humano, tienen en el modelo simulado.

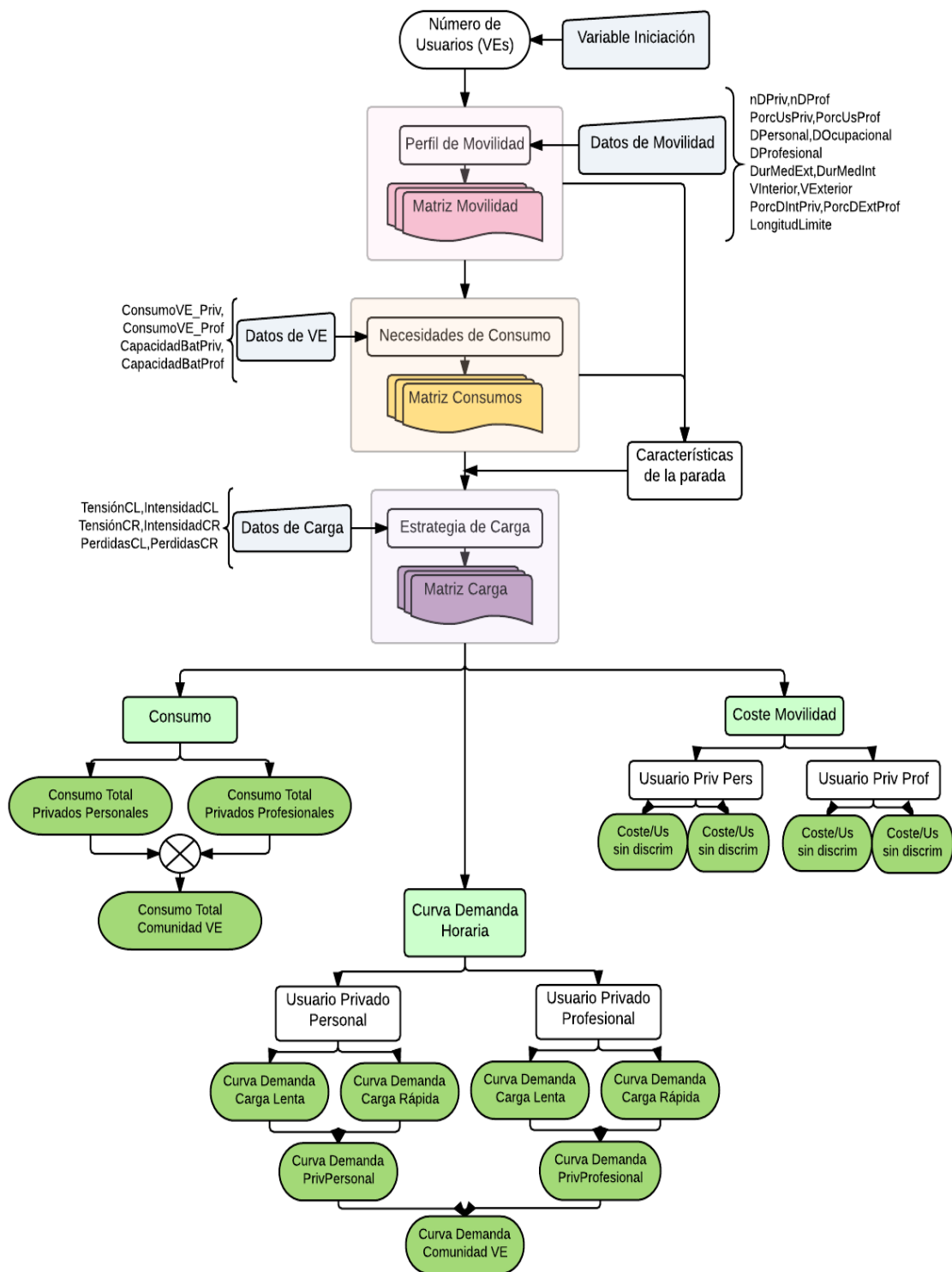


Imagen 6. Estructura general del programa creado y variables dato de entrada necesarias.

El alcance del programa se limita a usuarios de carácter privado, haciendo clara distinción entre dos tipos de usuarios: usuarios privados de tipo personal y usuarios privados de tipo profesional. Se les ha denominado como usuarios privados con el ánimo de hacer hincapié en que tales VE son pertenecientes a una entidad privada, bien sea una persona física (tipo personal) bien sea una empresa o compañía privada (tipo profesional), siendo el usuario la persona encargada de conducir tal VE, sea este o no el propietario real del mismo. Quedan fuera del estudio todos aquellos usuarios considerados públicos, dedicados en su mayoría al transporte o asistencia de personas, como son autobuses municipales, ambulancias, camiones de bomberos, etc.

En la Imagen 7 se muestra un diagrama de flujo con el funcionamiento del programa. Ante la dificultad de reflejar todo el programa en un simple diagrama, se ha representado tal funcionamiento de manera simplificada para aportar una idea general. En tonos azules aparecen las variables más significativas de las que hace uso el programa, siendo las cajas de azul degradado representación de las tres bases de datos fundamentales que se han de introducir en el programa. Analizando el diagrama, puede verse cómo, a partir de la definición del número de desplazamientos para cada usuario a realizar el día de simulación, $nD(j)$, estos son clasificados y el modelo queda fragmentado en dos: la parte encargada de la simulación de los usuarios de tipo privado personal y la análoga para usuarios profesionales. El funcionamiento y metodología de ambas, así como el conjunto de variables con las que se trabaja son altamente semejantes en cuanto a definición, no así los valores en sí. En rosa aparece representada la matriz de movilidad, en la cual queda constancia del perfil de movilidad de cada usuario simulado por el programa. En naranja se representan parte de las variables de consumo, esta matriz ha sido simplificada en el diagrama por falta de espacio y no aportar fundamento suficiente en la explicación del mismo. De manera semejante se ha procedido con la matriz de cargas, representada en morado. A lo largo del presente capítulo estas quedarán debidamente detalladas. Por último, en verde intenso aparecen reflejados los resultados que se obtienen del programa, nuevamente han sido simplificados. El programa devuelve las curvas de demanda y los consumos en Wh producidos en carga lenta y carga rápida así como la curva de demanda y el consumo total para cada tipo de usuario, además de aportar la curva global y el consumo total para todos los usuarios participantes en la simulación, independientemente del tipo que sean. En cuanto al coste, este ha sido calculado como valor promedio por usuario para cada conjunto de usuarios.

Así pues, como se ha visto, una vez queda definida la comunidad objeto de estudio, el programa asigna a cada usuario un número de desplazamientos para el día completo de simulación y define el tipo de usuario que es, metiéndolo en el grupo que corresponda. Según la Autoridad del Transporte Metropolitano del Área de Barcelona (ATM, Autoritat del Transport Metropolità) [45] y tal y como refleja en sus Encuestas de Movilidad Cotidiana (EMQ, Enquesta de Mobilitat Quotidiana) [46], se define como usuario profesional a aquel que realiza un número igual o mayor a 7 desplazamiento al día¹⁵. Siguiendo este criterio, el programa analiza el número total de desplazamiento que le ha sido asignado pseudoaleatoriamente a cada usuario para ese día y va ordenando a todos los usuarios en dos grandes grupos: los de tipo privado personal, aquellos que realizan entre 2 y 6 desplazamientos, y los de tipo profesional, aquellos que realizan más de 7.

¹⁵ Dentro de profesionales de la movilidad se encuentran: comerciales y técnicos de ventas, empleados de servicio técnico y técnicos en general y repartidores.



Imagen 7. Diagrama de flujo del funcionamiento del programa.

Ninguno de los agentes intervinientes en el sistema realiza menos de dos desplazamientos, garantizando el programa de esta manera el regreso de cada vehículo a su lugar de estacionamiento habitual, bien sea hogar o empresa. Conviene aclarar que se toma como aproximación que todos estos agentes serán residentes en el área geográfica que abarca la comunidad objeto de estudio, por esta razón todos partirán de la misma y regresarán a ella. Sí se considera la posibilidad de que tales agentes realicen desplazamientos que les lleven fuera de dicho área. No tiene en cuenta el programa, en cambio, aquellos usuarios que puedan llegar a entrar en el área estudiada pero que no pertenezcan a la misma. De este modo, y como forma de compensación de la posibilidad de que un usuario no residente en la comunidad entre en ella y realice una carga, las cargas realizadas por todos los usuarios residente se contarán como realizadas dentro de la citada comunidad, aunque existe la posibilidad de que un usuario residente, tras la realización de un desplazamiento exterior, realice una carga fuera de su comunidad. Se hace esta distinción entre áreas geográficas ya que cada una de estas pertenece a un Centro de Transformación, al cual le será demandada la energía eléctrica consumida y, por tanto, es el que debe ser capaz de absorber la nueva demanda.

Para la asignación del número total de desplazamientos diarios realizados por cada usuario, el modelo sigue una distribución probabilística de Poisson de tipo: $f(k, \lambda) = e^{-\lambda} \cdot \lambda^k / k!$, la cual permite conocer la probabilidad de ocurrencia del evento, durante un cierto periodo de tiempo, a partir de una frecuencia de ocurrencia media. Es una distribución de tipo discreto en la que tanto la varianza como el valor esperado de toda variable aleatoria, son iguales al número de veces que se espera que ocurra el fenómeno durante el intervalo de tiempo considerado, λ , siendo k el número de veces que ocurre el evento. Esta distribución de probabilidad suele usarse para el recuento de número de individuos por unidad de tiempo o de espacio o el número de vehículos que pasar por un lugar en concreto durante un cierto tiempo definido.

Siguiendo estas líneas y valorando la ausencia de memoria característica del tipo de distribución de Poisson, lo cual permite la no influencia entre individuos, se decide que es la más adecuada para la modelación del número de desplazamientos, tomando como valor λ el número medio de desplazamientos por persona y día para la comunidad en cuestión y como periodo de simulación un día entero. Para la obtención del valor λ se tiene en cuenta el número de desplazamientos que un agente de tipo privado personal realiza en un día así como dicho valor para un agente profesional, además del porcentaje de participación de cada uno de los tipos de agentes en la

citada comunidad, es decir, la probabilidad de que un usuario de la misma sea de un tipo u otro. En la Imagen 8 se presenta un esquema aclaratorio que detalla este aspecto.

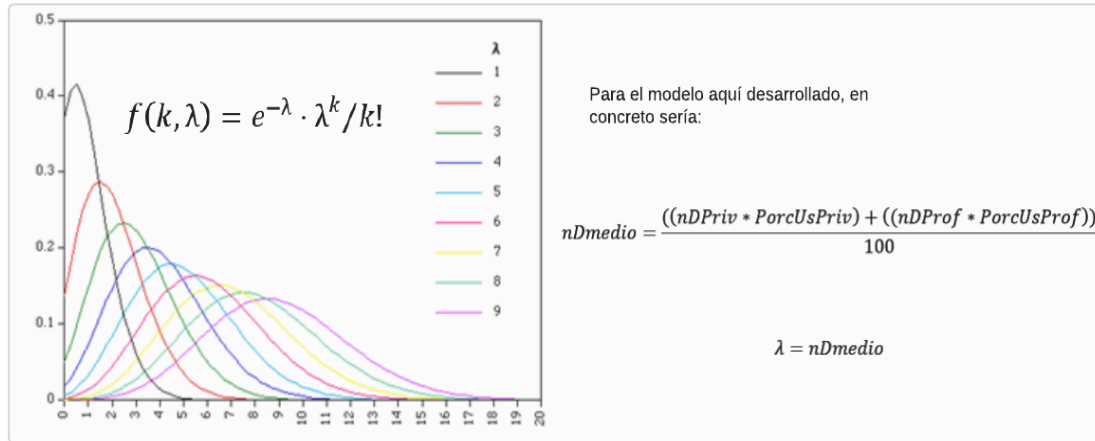


Imagen 8. Distribución de Poisson para la generación del número de desplazamientos por día que realiza cada usuario de VE de la comunidad objeto de estudio.

A partir del momento en que a todos los usuarios se les ha asignado grupo de pertenencia en función del tipo al que corresponden, el programa queda dividido en dos partes. Para cada una de ellas se elaboran tres grandes matrices. La primera registra el patrón de movilidad de cada usuario para el día completo, el cual es profundamente dependiente del tipo: privado personal o profesional. También en función de ese tipo, se le asigna aleatoriamente un modelo de VE, escogido del catálogo de modelos registrados por el programa para cada tipo de usuario. Con los datos registrados en la matriz de movilidad junto con las características técnicas del modelo de VE seleccionado, se elabora la matriz de consumos que registra consumos por desplazamiento y niveles de batería antes y después de estos. La tercera matriz, denominada matriz de cargas, registra si se realiza o no carga en cada parada del VE y la cantidad de energía que le sería demandada a la red en caso afirmativo, teniendo en cuenta el modo de carga seleccionado. A pesar de la absoluta dependencia de las tres matrices entre sí, la de consumos y la de cargas se relacionan aún más estrechamente ya que, para una misma iteración, la una puede cambiar en función de los datos que registre la otra. En apartados sucesivos se detallará todo esto en mayor profundidad.

3.3 DEFINICIÓN DE LA COMUNIDAD OBJETO DE ESTUDIO. DATOS DE ENTRADA Y CÁLCULOS PREVIOS.

El algoritmo implementado en este modelo tan solo hace uso de una variable de iniciación, el número de usuarios de VE participantes, y simula el periodo de tiempo correspondiente a un día completo, de doce de la madrugada de un día a doce de la madrugada del día siguiente. Cada usuario considerado es conductor de un único modelo de VE durante el día simulado, pudiendo ser este o no el propietario del mismo. Solo se reconocen usuarios de tipo privado, bien de VE de uso personal o de uso profesional. No se consideran como profesionales los desplazamientos al centro de trabajo, sino aquellos dedicados a la asistencia técnica, visitas de comerciales, trayectos de repartidores y similares. Los desplazamientos a los centros de trabajo por parte de vehículos no considerados como profesionales, están categorizados como desplazamientos privados personales con motivo ocupacional. Tampoco entra dentro del alcance del trabajo los considerados como vehículos para usos públicos, en su mayoría dedicados al transporte o asistencia de personal como pueden ser autobuses, autocares, ambulancias, camiones de bomberos y demás, al considerar claramente diferentes los hábitos de movilidad y carga de un usuario privado o los de uno perteneciente a organismo público y siendo ánimo de este trabajo la parametrización de la viabilidad o no de una comunidad de VE en el ámbito privado, el que afecta a la mayoría de usuario que puedan plantearse pasarse a esta nueva forma de movilidad.

Una vez introducida la variable de iniciación, se ha de alimentar el programa con una serie de datos que le permitan caracterizar la situación que se va a estudiar. Se trata de datos referentes a movilidad, que permiten la caracterización de la comunidad; características técnicas de los VE intervinientes, para la elaboración de los catálogos de VE disponibles para cada tipo de usuario; y características asociadas a los puntos de carga y a las tarifas energéticas en vigor. El programa se ha sido diseñado pensando en todo momento en la facilidad de disposición de los datos requeridos. Hace uso de datos públicos y al alcance de todo usuario, detallados en bases de datos y encuestas de movilidad, en catálogos aportados por los fabricantes y páginas webs de organismos oficiales y compañías eléctricas o empresas fabricantes de puestos de recarga.

Todos aquellos valores que se han considerado por experiencia difíciles de encontrar, son calculados por el programa partiendo de otros más sencillos de encontrar por los usuarios. Por ejemplo, se ha encontrado cierta dificultad para encontrar datos relativos a la longitud media de los desplazamientos diarios, siendo mucho más fácil dar con valores de duración media de

los mismos. Así pues el programa se encarga de calcular la longitud media en función de la duración y la velocidad.

Por tanto, tras la introducción de los datos y antes de comenzar con la simulación del comportamiento de la comunidad, el modelo desarrolla unos cálculos previos cuyos resultados serán necesarios para alimentar la simulación. En el Anexo I aparecen dichos cálculos previos según han sido implementados en la programación, junto con una tabla explicativa de los conjuntos de variables involucradas.

3.3.1 DATOS DE MOVILIDAD

El conjunto de datos de movilidad utilizados para la caracterización de la comunidad se puede dividir en tres grupos: los referentes a número de desplazamientos y a porcentaje de participación de los tipos de usuarios considerados, las distribuciones horarias de los desplazamientos realizados según tipo de usuario y motivos de su realización, y la duración y velocidad media de los desplazamientos en función del origen y destino de cada uno de ellos. En la Imagen 6, adjuntada anteriormente, quedaban detallados tales conjuntos de datos.

3.3.1.1 NÚMERO DE DESPLAZAMIENTOS MEDIO POR PERSONA Y DÍA

La asignación del número total de desplazamiento realizados por cada usuario en un día, como se indicó anteriormente, sigue una distribución de Poisson. Tal distribución genera valores en torno a un valor medio, en este caso, el número medio de desplazamiento por persona y día. En toda comunidad existe una clara diferencia entre el número de desplazamientos realizados por un usuario privado de tipo personal en un día y los realizados por uno de tipo profesional, siendo significativamente mayor el de este último. Tampoco es igual el grado de penetración que los usuarios privados personales y los profesionales tienen en la comunidad, existiendo muchos más de los primeros en un día entre semana. Esta diferencia es mucho más acusada en el caso de que el día simulado sea fin de semana o festivo, en cuyo caso el grado de participación de los usuarios privados profesionales se reduce en un nivel tal que estos se vuelven insignificantes en el estudio.

Así con todo, los datos con los que trabaja el sistema en este sentido son el número medio de desplazamientos por persona y día y el porcentaje de usuarios privados de tipo personal, así

como el número medio de desplazamientos por persona y día y el porcentaje de usuarios privados de tipo profesional que interviene en la comunidad. Con esto se obtiene el número medio de desplazamiento por persona y día característico de la propia comunidad, con el que se alimentará la distribución de Poisson. A modo aclaratorio puede recurrirse nuevamente a las Imagen 6, de estructura y conjunto de variables del programa, y la Imagen 8, de distribución de Poisson.

3.3.1.2 DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LOS DESPLAZAMIENTOS

La movilidad cotidiana de los residentes en una ciudad viene muy marcada por el factor tiempo, presentándose ciertos periodos de tiempo a lo largo del día con una elevada concentración de desplazamientos en comparación con otros. Estos varían mucho en función de muy diversos factores como son el tipo de desplazamiento que se realiza o el motivo del mismo, el día de la semana, si se realiza en invierno o en verano, incluso factores sociales como el sexo o la edad del usuario que lo realiza, entre otros.

En este caso, dentro de los usuarios privados de tipo personal se ha observado que existe una influencia bastante marcada del motivo por el cual el usuario se desplaza, diferenciándose claramente dos motivos: desplazamiento por motivo ocupacional, como ir al lugar de trabajo o estudios, y desplazamiento por motivo personal, dentro del cual se engloban los realizados por ocio, compras, visitas a familiares y amigos, etc. Además, dentro de estos, se pueden diferenciar dos grupos más, engrosados por aquellos destinados a la vuelta a casa o lugar de aparcamiento habitual, bien por motivo personal bien por motivo ocupacional.

En este trabajo se ha optado, debido a la similitud de datos, por aglutinar todos los desplazamientos por motivo ocupacional en un grupo y por motivo personal en otro, independientemente de si son de ida, intermedios o de regreso. Así pues, el programa hace uso de los datos de distribución horaria de los desplazamientos realizados por usuarios privados de tipo personal por motivo ocupacional, los mismos por motivo personal y los desplazamientos realizados por usuarios privados de tipo profesional. Se realiza un recuento del número total de desplazamiento según hora, tipo y motivo y se calculan las probabilidades de desplazamiento horarias asociadas a cada grupo y sus probabilidades acumuladas, extrapolando los datos de una comunidad entera al número de VE específico de esa comunidad, participante en el estudio. En

el siguiente capítulo se aportan gráficas que ilustran estos cálculos con los resultados obtenidos para la comunidad que se ha simulado.

Estos valores serán necesarios durante la simulación a la hora de asignar los instantes de inicio de cada uno de los desplazamientos, de manera que se incluya este rasgo de temporalidad a la aleatoriedad en la elaboración de patrones de movilidad para los usuarios.

3.3.1.3 DURACIÓN, VELOCIDAD Y LONGITUD MEDIAS DE DESPLAZAMIENTO

Son tres variables interrelacionadas y de elevada influencia en el consumo de un VE. A la hora de localizar registros de estos valores en bases de datos recogidos de experimentos reales, ha resultado mucho más sencillo encontrar las duraciones medias de los desplazamientos, que dicho valor medio para longitudes. Por esta razón el programa, haciendo uso de los valores de duración y velocidad medias, calcula la longitud media de desplazamiento. Pero todo ello depende a su vez del tipo de desplazamiento estudiado, determinado la mayoría de las veces por la longitud del mismo, como se explica en el apartado 2.2.

En este trabajo se hace distinción entre dos tipos de desplazamiento, definidos como: desplazamientos internos, realizados dentro de la ciudad y algunos barrios periféricos, y desplazamientos externos, cuya zona de actuación abarca los pueblos del municipio. Se ha de aclarar que el alcance del presente estudio se limita a entornos puramente urbanos, no incluyéndose pueblos o ciudades del extrarradio.

Así, el modelo parte del valor de longitud límite para desplazamiento interno, de las duraciones medias para desplazamiento interno externo y de las velocidades promedio fijadas para interior y exterior. Es indudable que la velocidad de circulación del vehículo afecta al consumo del mismo, pero para la tecnología de VE no existen datos aportados por los fabricantes en relación a esto, sino que los valores de consumo detallados en los catálogos están referenciados a velocidades promedio. Por esta razón, en este estudio se ha obviado la influencia de la velocidad en el consumo del vehículo y se recurre a valores promedio. Aun así, estos son datos a introducir al principio del programa y, por tanto, pueden hacerse variar como convenga.

Por otra parte, el porcentaje de desplazamientos internos y externos llevados a cabo en un día no es, ni de lejos, el mismo. Por ello, a los valores de partida indicados antes se le suman los porcentajes de ocurrencia asociados a cada tipo de desplazamiento aquí considerado, y se llega

la longitud media de desplazamiento para la comunidad objeto de estudio. Este valor servirá para alimentar la distribución de probabilidad de tipo exponencial de la que se hace uso para la generación de la longitud de cada desplazamiento realizado por cada usuario, como se explica en el apartado 3.4.1.1.

3.3.2 DATOS DE VEHÍCULO ELÉCTRICO

El programa elabora un catálogo con los modelos de VE reales más representativos del mercado que mejor se adaptan a las características propias de cada tipo de usuario. Como partida, se toman tres modelos reales para usuarios privados personales y otros tres para profesionales, registrándose de cada modelo su consumo eléctrico, en Wh/km, y la capacidad de la batería, en Wh, de la que hace uso. Dentro del primer grupo, todos los modelos registrados son tipo turismo. En cambio, con objeto de cubrir la mayor parte de los requisitos que puedan surgir, en el caso de usuarios profesionales la variedad es más amplia apareciendo en el catálogo un modelo de turismo, otro de furgoneta y otro de furgón.

Se ha optado por seleccionar estas dos características técnicas, aportadas por los fabricantes, al ser las de mayor influencia en el cálculo de consumos y niveles de batería, así como de proceso de carga. Con relación a esto último, teniendo por objeto asegurar un nivel de batería suficiente en todo momento en todos los VE de la comunidad, de manera tal que ningún usuario quede desabastecido de carga en medio de un desplazamiento, el programa va a diseñar el desplazamiento de requerimientos más exigentes que podría darse en la comunidad. No es más que aquel de mayor longitud y mayor consumo. Para ello va a ser necesario considerar que tal desplazamiento se realiza con el modelo de VE de mayor consumo y es así pues que una vez elaborado el catálogo de VE existentes en la comunidad objeto de estudio, se registra aquel modelo de consumo eléctrico más elevado y la capacidad de su batería.

3.3.3 DATOS DE CARGA Y TARIFA ELÉCTRICA

El sistema reconoce dos modos de carga, los más generales a día de hoy: modo de carga lenta y modo de carga rápida. Dentro del modo de carga lenta se aglutinan las tres variedades existentes, detalladas en el apartado 2.1.4. Como hipótesis se asume que todo punto de carga vale para todo modelo de VE, defendiendo con esto la idea de que según se vaya instaurando esta nueva

tecnología se irá estandarizando hasta llegar a hacer todos los VE de los mismos tipos de conectores, según modo de carga, y de los mismo tipo de baterías, según requerimiento del modelo de VE.

Para la caracterización de cada modo de carga se toman los valores de tensión y corriente con los que se llevará a cabo la misma, teniéndose en cuenta también un factor de pérdidas asociado a todos los conductores. Con estos valores se determina la potencia que el punto de carga absorberá de la red y la potencia que le llegará a la batería del VE, en Wh, que será inferior a la anterior debido al factor de pérdidas.

El modelo elabora un registro de las cargas realizadas por los usuarios a lo largo del día y de los requerimientos a red de cada una de ellas, junto con la hora a la que se realiza cada carga y el modo escogido. Con esto no solo se elaboran las matrices de consumos y cargas, sino que se toman datos para la elaboración de curvas de demanda horaria, similares a las elaboradas para la demanda convencional, y para la elaboración de un registro de costes asociados a la movilidad con VE.

Centrando la atención en los costes, el modelo aporta un presupuesto diario de movilidad con esta tecnología que puede ser fácilmente comparado con uno de movilidad con VCI. A la hora de elaborar este presupuesto, se tienen en cuenta las diferentes posibilidades de tarifa energética a la que los usuarios pueden acogerse a día de hoy. Se parte de los valores de coste de energía consumida de una tarifa sin discriminación horaria y de otra con discriminación horaria. Para esta última se analiza si la carga se realizó en hora valle o en hora pico y en función de ello se le asigna el citado coste de energía consumida. Además se tiene en cuenta el Impuesto Especial sobre la electricidad. Con ello se calcula el coste, en euros, de cada carga realizada por cada usuario y se elabora un presupuesto diario por usuario. Con esto se llega a la estimación del coste diario que lleva asociado el desplazarse con VE en una ciudad y sus alrededores, siguiendo unos hábitos altamente similares a los que se siguen cuando se hace uso de VCI.

3.4 SIMULACIÓN DEL MODELO ELABORADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE UNA COMUNIDAD DE VE.

Tras la recogida de los datos de partida y la elaboración de los cálculos previos necesarios para la adecuación de las variables a las necesidades del sistema, comienza la simulación del modelo para la estimación de la demanda eléctrica para unos usuarios de tipo privado personal y la misma para otros usuarios de tipo profesional, en un día cualquiera de entre semana. En el caso de que la estimación de demanda fuera para un día festivo o fin de semana, solo se tendrá en cuenta a los usuarios de tipo privado personal y sus diferentes motivos.

A continuación se pasa a describir el modelo desarrollado en Matlab para cada uno de los dos tipos de usuario considerados en un día entre semana. En todo momento la intención ha sido la de elaborar un modelo de marcado carácter generalista, de forma tal resultase fácilmente adaptable a cualquier comunidad deseo de análisis. Con objeto de añadir el máximo de realismo posible, todos los valores generados son de carácter aleatorio o pseudoaleatorio y se tienen en cuenta ciertos parámetros probabilísticos y estadísticos. Así mismo, para lograr la simulación en diferentes escenarios añadiendo realismo y pudiendo tener en cuenta el carácter estocástico de la demanda eléctrica, la simulación se hace bajo el patrón del método Monte Carlo.

3.4.1 USUARIOS PRIVADOS DE TIPO PERSONAL

El modelo desarrollado está organizado fundamentalmente en tres grandes matrices, a las que se le añaden algunas secundarias que almacenarán diferentes datos concretos, como los necesarios para la generación de las curvas de demanda horaria según el modo de carga seleccionado y la curva de demanda horaria general, así como para la elaboración del presupuesto de movilidad con VE

Así pues, el programa se centra en la elaboración de las matrices generales, de las cuales se extraerán los valores que rellenan las secundarias. Se elabora una matriz general por cada aspecto fundamental de influencia en la demanda eléctrica asociada a un VE, que son: las características de movilidad propias de cada usuario en función del grupo al que pertenece y las razones que motivan su movilidad, los consumos asociados a cada desplazamiento según las necesidades de movilidad del usuario que los realiza y del modelo de VE usado para realizados y las cargas realizadas en función del modo de carga, del momento y la situación bajo la que se

toma la decisión de cargar así como, nuevamente, las necesidades de movilidad de la persona en cuestión.

3.4.1.1 MATRIZ DE MOVILIDAD

Todo individuo de una comunidad, a lo largo de un mismo día, realiza desplazamientos por diversos motivos. Pero para algunos casos, como el de los usuarios de tipo profesional, estos motivos guardan tal semejanza que se pueden asumir en un mismo grupo, como se explicará en el apartado 3.4.2. En cambio, para un usuario privado de tipo personal tales motivos son susceptibles de ser estudiados por separado. Dependiendo de la base de datos o estudio consultado, se observarán unas divisiones u otras. En este trabajo se ha optado por separar los desplazamientos de un mismo usuario de tipo privado personal, realizados en un mismo día, en dos motivos: desplazamientos por motivo personal y desplazamientos por motivo ocupacional.

Por esta razón, como primer paso, el programa asocia a cada desplazamiento i de cada usuario j un motivo de desplazamiento, $MotivoD(i,j)$, asignando un 1 cuando el motivo es personal y un 2 cuando el motivo es ocupacional. Se le otorga un 0 a aquella posición i en la cual el usuario j no realice ningún desplazamiento. Esto se lleva a cabo de manera pseudoaleatoria, teniendo en consideración que ambos motivos no se dan en la misma proporción, siendo ligeramente mayor el número de desplazamiento ocupacionales entre semana y significativamente superior el de personales en fin de semana o festivo.

Una vez definido el motivo, se pasa a la asignación de la hora de inicio de cada desplazamiento, $InicioD(i,j)$. Esto se hace nuevamente de manera pseudoaleatoria en función del motivo del mismo y teniendo en cuenta la distribución horaria de los desplazamientos para ese motivo, $PAcumuladaSPersonal$ o $PAcumuladaDOcupacional$. Se genera aleatoriamente un valor de probabilidad acumulada, se busca el valor más cercano a este de entre los datos registrados para ese tipo de usuario según ese motivo y se registra la hora a la que corresponde ese valor de probabilidad acumulada.

De manera independiente, se le asigna a cada desplazamiento i su longitud, $LongitudD(i,j)$. Para la generación de las diferentes longitudes, se recurre a una distribución de probabilidad de tipo exponencial. Tras el análisis de diferentes estudios relativos a este aspecto [67,68] se ha podido observar como de manera general la probabilidad acumulada de esta variable presenta una tendencia exponencial a lo largo del tiempo, del tipo: $P(x) = 1 - e^{-x}$. Este tipo de distribución

puede ser, además, considerada adecuada para modelizar la distribución probabilística del intervalo temporal entre dos sucesos modelados según una Poisson. Se alimenta esta distribución con el valor de longitud media de desplazamiento por persona y día, $LongMediaD$, en la que se tiene en cuenta las longitudes medias de los desplazamientos internos y externos así como la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos a lo largo de un día. En la Imagen 9 se detalla más claramente este aspecto. Una vez que al desplazamiento i del usuario j le ha sido asignada una longitud, se pasa a su clasificación.

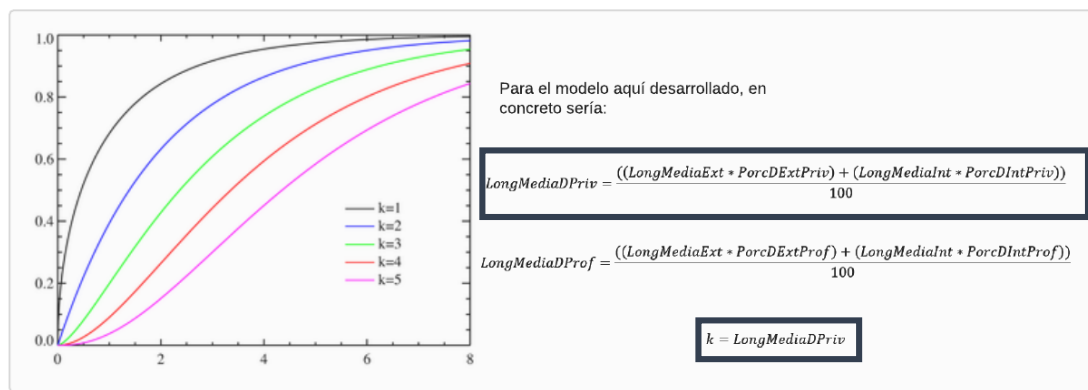


Imagen 9. Distribución exponencial, para la generación de la longitud de cada desplazamiento realizado por cada usuario de tipo privado personal de la comunidad objeto de estudio.

Si la longitud del desplazamiento es inferior a la longitud que delimita los desplazamientos interno y externo, $LongitudLimite$, para la comunidad objeto de estudio, este es clasificado como desplazamiento interno y se le asocia la velocidad promedio para este tipo de desplazamiento, $VInterno$. En caso contrario, es externo y se le asigna su velocidad, $VExterno$, correspondiente de manera análoga. Una vez identificadas longitud y velocidad del desplazamiento en cuestión, la obtención de la duración, $DuracionD(i,j)$, del mismo es inmediata.

Llegado este punto ya son conocidas la hora de inicio del desplazamiento y su duración, por lo que se puede calcular el instante en el que el desplazamiento i del usuario j llega a su fin, $FinD(i,j)$. En este momento es precisamente cuando se inicia el periodo de estacionamiento del vehículo, susceptible de ser analizada la elección del usuario de cargar o no cargar y el dimensionamiento de la carga en caso de ser la elección. De esta manera quedaría completada la matriz de movilidad, la cual registra las características de la movilidad diaria de cada individuo que forma la comunidad.

Conviene aclarar que el programa asegura en todo momento que ningún desplazamiento finaliza más tarde de las doce de la madrugada del día simulado y, por extensión, tampoco existe desplazamiento que se inicie a esa hora. La matriz en su conjunto está ordenada, para cada usuario, en función de las horas de inicio de los desplazamientos de este. Queda excluida también la posibilidad de que se generen dos desplazamientos para un mismo usuario j a la misma hora o el solapamiento de desplazamientos de un mismo j , es decir, no es posible que se inicie un desplazamiento sin haberse finalizado previamente el anterior. Atendiendo al registro de hora de inicio y fin se crea un vector que será de crucial importancia a la hora de caracterizar las cargas o incluso a la hora de decidirse por la realización de una carga o no, este es el tiempo entre desplazamiento, $TiempoEntreD(i,j)$. Este aspecto se tratará con más detalle en apartados sucesivos.

3.4.1.2 MATRIZ DE CONSUMOS

Una vez quedan definidas las características de movilidad de cada usuario j para el día de simulación, se puede comenzar a dimensionar los consumos asociados a tales necesidades de movilidad, teniendo en cuenta también el modelo de vehículo del que haga uso cada usuario. En un modelo como el elaborado, es de vital importancia que se asegure el nivel de batería suficiente para completar la totalidad del desplazamiento que el usuario esté realizando, no quedándose sin batería en mitad del mismo. Con este objeto, el programa analiza las necesidades de movilidad del conjunto de la comunidad que conforman este tipo de usuarios y dimensiona el que sería el caso más conservador, $ConsumoMax_Wh$. Es decir, se calcula el desplazamiento de mayor exigencia energética, que corresponderá con aquel de mayor longitud, $LongMax$, y realizado con el VE que más consuma de todos los considerados, $ModConMaxPriv$. Así, se saca el nivel de batería que requiere tal desplazamiento, $ConsumoMax$, según la capacidad de batería del citado modelo de VE de mayor consumo. Este valor es tenido en cuenta a la hora de caracterizar la elección de carga, de manera tal que se asegure que el usuario, tras su parada, disponga de un nivel de batería suficiente para asumirlo. Esto es analizado en paralelo con el tiempo disponible para la posible carga, $TiempoParada(i,j)$, que no es más que el tiempo entre desplazamientos.

Determinado esto, que será comúnmente aplicable a todos los usuarios de tipo privado personal, se le asocia de manera aleatoria a cada usuario j un modelo de vehículo m del catálogo de vehículos registrados para este tipo de usuario. Conociendo así tanto las variables de

movilidad que caracterizan los requerimientos del usuario j como las de vehículo, con lo que se puede dar comienzo al cálculo del consumo que supone cada desplazamiento i , $ConsumoD_Wh(i,j)$, en función de la longitud del mismo y del consumo del VE, $ConsumoVE_Priv(m)$, con el que se realiza, obteniendo el dato en Wh. A continuación se calcula el porcentaje de batería que ese consumo representa del total de la batería, $ConsumoD_%$, del citado modelo de VE, en función de la capacidad de la misma, $CapacidadBateriaPriv(m)$.

Por otro lado, el modelo analiza el estado de la batería o estado de carga (SOC, Stage Of Charge) al inicio del desplazamiento i del usuario j , tanto en porcentaje, $SOC_In(i,j)$, como en Wh, $EstadoBIn_Wh(i,j)$, de manera que le sea posible actualizar el estado de batería al finalizar dicho desplazamiento. Llegado este punto el programa toma registros del estado final, $SOC_Fin(i,j)$ y $EstadoBFin_Wh(i,j)$, de la batería tras descontar al inicial el consumo individual del desplazamiento. Se entiende por estado de carga o SOC a la capacidad de una batería en un momento determinado, es el equivalente al depósito de gasolina de un VCI y se representa en tanto por ciento de una referencia de carga completa. Este parámetro debe ser actualizado periódicamente según el envejecimiento de la batería en cuestión, pero como aproximación en este trabajo se va a ignorar el envejecimiento de las baterías ya que se simula un solo día y se ha tomado como hipótesis que todas las baterías están en perfectas condiciones.

Esta matriz se actualiza en cada iteración del sistema en función de las elecciones de carga o no carga y del modo de carga que se lleve a cabo, en su caso, así como del tiempo de duración de la misma. Es decir, según se avanza en el proceso de generación de la matriz de cargas, la de consumo se va modificando acorde con esta, asegurando la concordancia de datos en todo momento.

3.4.1.3 MATRIZ DE CARGAS

Cada vez que el usuario j llega a su destino tras efectuar el desplazamiento i , el programa analiza el estado de parada. Se considera que cada vez que el vehículo estaciona queda automáticamente conectado a red. Puede que con los métodos de carga conductivos utilizados mayoritariamente en la actualidad, esta afirmación no resulte del todo común pero es un hecho básico para la implementación de sistemas V2G y algo inmediato si se desarrollan los métodos de carga inductivos, razón por la cual se asume posible en este trabajo. Una vez que el vehículo queda conectado a red, el usuario cuenta con la posibilidad de realizar una carga, en modo lento

o modo rápido, según deseo o necesidad. Estas decisiones quedan registrada por el programa en la matriz de carga ya que tanto si se carga como si no, se influye en el perfil de consumo. Si el usuario decide cargar, se le realizará una solicitud a la red y se verá incrementado el nivel de batería en la medida en que la carga determina. En contra, la decisión del usuario de no cargar y esperar a más adelante, también tiene impacto en el sistema desde el punto de vista de que en la siguiente parada en la cual el usuario j decida realizar una carga la solicitud a la red será mayor, aunque sí es cierto que no supone cambio en la matriz de consumos para esa iteración.

La decisión de carga se efectúa evaluando una serie de criterios en cada parada. En primer lugar se analiza la duración de la misma, $TiempoParada(i,j)$. Este dato es de elevada influencia en la decisión. Si la parada es demasiado breve y el nivel de batería es aceptable, la carga carece de sentido ya que supone perder un ciclo de carga de la batería a cambio de un porcentaje de batería insignificante. Por otro lado, si en dicha parada breve el usuario j cuenta con un nivel de batería crítico, lo más seguro es que se vea obligado a realizar una carga rápida. Así pues, en función de las características de la comunidad y de las necesidades de los usuarios y sus vehículos, se establecen unos criterios generales de si es necesaria la carga, si es posible la carga por mero deseo del usuario o si no se realiza carga en esa parada, que serán detallados en este apartado.

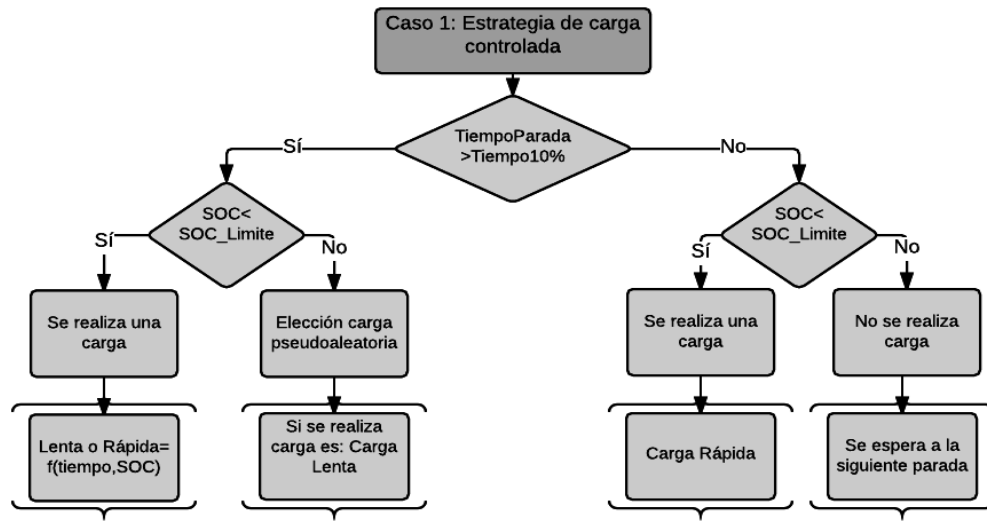
El modelo establece como mínimo aceptable para la consideración de una carga, alcanzar un 10% de batería¹⁶. En función del modelo de VE m correspondiente al usuario j , se estima el tiempo mínimo que llevará al puesto de carga lenta aportar la potencia correspondiente a ese 10% para esa batería, $Tiempo10(j)$. Conviene aclarar que la estimación se lleva a cabo asumiendo una carga en modo lento, no solo por tratarse del caso más conservador sino porque el programa da en todo momento prioridad a este modo. Por otro lado, se estima el consumo asociado a un desplazamiento externo medio y se establece el consumo, en porcentaje de batería para esa batería en concreto según $CapacidadBateriaPriv(m)$, que supondría realizar dos tercios de tal desplazamiento, $SOC_Ext(j)$, teniendo en cuenta el consumo del vehículo, $ConsumoVE_Priv(m)$.

Con esto, en cada parada se analiza si el tiempo de parada y el estado de la batería al finalizar el desplazamiento son inferiores o superiores a $Tiempo10(j)$ y $SOC_Ext(j)$ y se establecen cuatro situaciones posibles de ocurrencia general que condicionan la decisión de carga y dimensionan

¹⁶ Un 10% de capacidad de batería se cifra en unos 2.25 kWh, para la capacidad de batería media del todos los modelos incluido en el catálogo de VE considerado en el presente estudio. Esa potencia permite un desplazamiento de 3.66 minutos, lo cual resulta del todo insignificante para el caso tratado.

la misma, en caso afirmativo, como puede apreciarse en la Imagen 10. Las situaciones consideradas son:

- 1) $TiempoParada(i,j) > Tiempo10(j)$ y $SOC_FinD(i,j) \leq SOC_Ext(j)$. El usuario dispone de tiempo aceptable para plantearse la carga y un nivel de batería no tan aceptable, así pues se realiza una carga. Para la determinación del modo de carga más adecuado se estima la potencia que le sería suministrada a la batería en modo de carga lento. Si dicho valor es suficiente para cubrir el caso más exigente para esa comunidad y ese tipo de usuario, $ConsumoMax_Wh$, más un extra de seguridad, se selecciona el modo de carga lenta. En caso contrario, se selecciona el modo de carga rápida.
- 2) $TiempoParada(i,j) > Tiempo10(j)$ y $SOC_FinD(i,j) > SOC_Ext(j)$. El usuario dispone de tiempo aceptable para plantease la carga y un nivel de batería también aceptable. En este caso la carga no sería necesaria, pero debido a la alta posibilidad de que el usuario j presente el conocido “*ranxe anxiety*” o ansiedad por la autonomía, el programa genera pseudoaleatoriamente una “decisión de carga” del usuario, otorgándole una probabilidad de ocurrencia mayor al suceso “no cargar”. En caso de que la decisión sea cargar, tan solo se contempla el modo de carga lenta debido a la no criticidad del asunto.
- 3) $TiempoParada(i,j) < Tiempo10(j)$ y $SOC_FinD(i,j) \leq SOC_Ext(j)$. El usuario dispone de un tiempo muy limitado para la carga y de un nivel de batería también muy limitado para asegurar autonomía. Se presenta una situación de urgencia o crítica, por lo que se selecciona la realización de una carga en modo rápido. Este tipo de carga asegura la obtención del 80% de la capacidad de la batería en tan solo 20 minutos de carga.
- 4) $TiempoParada(i,j) < Tiempo10(j)$ y $SOC_FinD(i,j) \leq SOC_Ext(j)$. El usuario dispone de tiempo muy limitado para la carga y un nivel de batería aceptable para asegurar la autonomía. Dada esta situación, se asume que el usuario no realizará carga durante la parada.



Tiempo10%: tiempo necesario para carga al menos el 10% de la batería, en función de su capacidad (diferente para cada modelo de VE).
SOC: Estado de la batería tras a realización de una carga lenta durante el tiempo de parada.
SOC_Limite: Nivel de batería necesario para cubrir un desplazamiento de longitud media, específico para la comunidad estudiada.

Imagen 10. Estrategia de carga seguida por los usuarios de la comunidad objeto de estudio, independientemente del tipo de usuario.

El programa da prioridad en todo momento al modo de carga lenta, al ser el de menor impacto para la red y además preverse como el más económico para el usuario. Todas las estimaciones que se realizan y los valores límite que se asumen se determinan para el caso más conservador que pueda darse en la comunidad objeto de estudio, en función de las características propias de esta, de las necesidades de movilidad de sus usuarios y de los modelos de vehículo interviniente. Por otra parte, se toma como hipótesis que cada vez que así lo requiera, el usuario dispondrá de un puesto de carga libre y en el lugar de estacionamiento, para el modo de carga que elija y siendo común la conexión para todos los modelos de VE y todos los puesto de carga.

Cada vez que se realiza una carga, se calcula la potencia recibida por la batería, $PotAbsBat(i,j)$, durante el tiempo que dura la parada, $TiempoParada(i,j)$, así como la potencia total que habrá en la misma al fin de la carga, $PotBatDesp(i,j)$ en Wh y $SOC_Desp(i,j)$ en % de batería. También se calcula la potencia real que el puesto de carga ha suministrado, $PotRealCon(i,j)$, al ser esta por la que el usuario paga y la cual es superior a la que recibe la batería, en una proporción dependiente del factor de pérdidas de la instalación. En todo momento se asegura que la potencia en la batería no excede la máxima admisible, fijada por la capacidad con la que ha sido diseñada, $CapacidadBateria(m)$. Para el caso de carga rápida, el valor máximo que se alcanza en toda carga es del 80% la capacidad de la batería. Se asume este hecho para salvaguardar la vida

de la batería, ya que si se llega al 100% de su capacidad en las condiciones de carga rápida, para una batería supondría un elevado grado de deterioro.

En cada iteración de desplazamiento se toman registros de la potencia real demandada a la red y la hora y el modo en que dicha demanda fue realizada, con el objeto de poder disponer de los datos necesarios para la elaboración de curvas de demanda horaria según tipo de usuario y modo de carga. Así mismo, se dispondrá de datos para la estimación del coste asociado a cada desplazamiento de cada usuario, con los que poder realizar un presupuesto estimado diario de movilidad con VE. Tales registros aparecen detallados en la Imagen 11, la Imagen 12 y la Imagen 13.

REGISTRO PARA UNA CARGA LENTA

```

%REGISTRO DE DATOS DE CARGA LENTA Y CARGA RÁPIDA
%Potencia demandada a red durante la carga
PotDemCL(i,j)=Cargas(i,j,5);
PotDemCR(i,j)=0;
%Hora de la carga
HoraDem(i,j)=Movilidad(i,j,5);

%CURVA DE DEMANDA EN CARGA LENTA Y CARGA RÁPIDA
CurvaDemandaCL(i,j,1)=PotDemCL(i,j); %En Wh
CurvaDemandaCL(i,j,2)=HoraDem(i,j); %En h
CurvaDemandaCR(i,j,1)=0;
CurvaDemandaCR(i,j,2)=HoraDem(i,j);
    
```

Imagen 11. Registro de datos en cada parada en la que se realiza una carga en modo lento. Código fuente.

REGISTRO PARA UNA CARGA RÁPIDA

```

%REGISTRO DE DATOS DE CARGA RÁPIDA Y CARGA LENTA
%Potencia demandada a red durante la carga
PotDemCR(i,j)=Cargas(i,j,5);
PotDemCL(i,j)=0;
%Hora de la carga
HoraDem(i,j)=Movilidad(i,j,5);

%CURVA DE DEMANDA EN CARGA RÁPIDA Y CARGA LENTA
CurvaDemandaCR(i,j,1)=PotDemCR(i,j); %En Wh
CurvaDemandaCR(i,j,2)=HoraDem(i,j); %En h
CurvaDemandaCL(i,j,1)=0;
CurvaDemandaCL(i,j,2)=HoraDem(i,j);
    
```

Imagen 12. Registro de datos en cada parada en la que se realiza una carga en modo rápido. Código fuente.

```
REGISTRO PARA UNA CARGA EN GENERAL
%REGISTRO DE DATOS DE CARGA GENERAL
%Potencia demandada a red durante la carga
PotDem(i,j)=Cargas(i,j,5);

%Hora de la carga
HoraDeman(i,j)=Movilidad(i,j,5);

%CURVA DE DEMANDA GENERAL
CurvaDemanda(i,j,1)=PotDem(i,j); %En Wh
CurvaDemanda(i,j,2)=HoraDeman(i,j); %En h
```

Imagen 13. Registro de datos en cada parada en la que se realizada una carga. Código fuente.

Se asume que tras su último desplazamiento para el día simulado, *MaxDPPrivados*, todo VE ha llegado a su lugar de estacionamiento habitual. Aquí se realizará una carga lenta doméstica completa al 100% de *CapacidadBateria(m)*. Los valores de energía demandada y hora de demanda de esta última carga también quedan registrados en la correspondiente matriz. Pero para este caso, se realizará un análisis más detallado de la hora de carga, de manera que se contempla la posibilidad, atendiendo a la tarifa eléctrica, de desplazar la citada carga a horas valle de forma tal que los beneficios reviertan tanto en usuario como en sistema.

3.4.1.4 CONCLUSIÓN

Con esto queda caracterizado el comportamiento de cada usuario *j* de tipo privado personal perteneciente a la comunidad objeto de estudio, para cada desplazamiento *i* del día simulado. En las tres imágenes adjuntas queda reflejado como se almacenan los datos de movilidad, consumos y cargas en el programa. Como se ha comentado, el programa creado en este trabajo está desarrollado en Matlab, herramienta que trabaja fundamentalmente con vectores y matrices. Además otorga la posibilidad de utilizar matrices multidimensionales en la cuales se accede a las diferentes páginas o capas de la tercera dimensión mediante un tercer subíndice, Imagen 14.

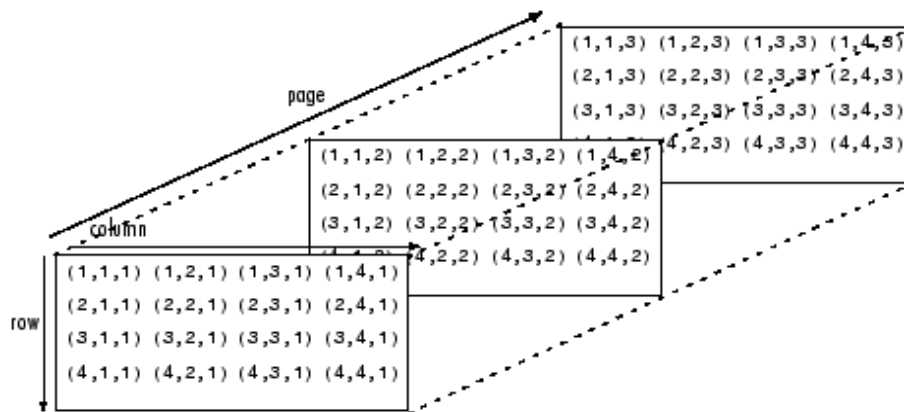


Imagen 14. Ejemplo de matriz multidimensional, del tipo de las matrices Movilidad, Consumos y Cargas usadas en el programa elaborado. Matlab [70].

En este programa, la recogida de los valores simulados que dimensionan la comunidad creada se lleva a cabo en tales matrices multidimensionales, en las cuales el número de “capas” vendrá determinado por el número de desplazamiento realizado por el usuario j en función del tipo de usuario y el cual cambiará para cada simulación, no existiendo dimensión fija preestablecida sino siendo esta adaptable según la propia simulación. En la Imagen 15, Imagen 16 y la Imagen 17 se resume cómo quedarán organizadas tales matrices multidimensionales de manera general en el citado programa.

```

%%% MATRIZ DE MOVILIDAD %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Movilidad(:, :, 1)=Motivo desplazamiento tipo privado (pers;ocup)
%
%      ="MotivoD(i,j) "
%Movilidad(:, :, 2)=Hora de inicio de cada desplazamiento [horas]
%
%      ="InicioD(i,j) "
%Movilidad(:, :, 3)=Longitud de cada desplazamiento en [Km]
%
%      ="LongitudD(i,j) "
%Movilidad(:, :, 4)=Duración de cada desplazamiento en [horas]
%
%      ="DuraciónD(i,j) "
%Movilidad(:, :, 5)=Hora de fin de cada desplazamiento [horas]
%
%      ="FinD(i,j) "
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Imagen 15. Estructura de la matriz Movilidad. Registra el perfil de movilidad de cada usuario participante en la comunidad objeto de estudio.


```

%%% MATRIZ DE CONSUMOS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Consumos(:, :, 1)=Consumo de cada desplazamiento individual [Wh]
%      ="ConsumoD_Wh(i, j) "
%Consumos(:, :, 2)=Consumo de batería de cada desp individual [%]
%      ="ConsumoD_%(i, j) "
%Consumos(:, :, 3)=Potencia disponible en la batería al inicio
%      de cada desplazamiento [Wh]
%      ="EstadoBIn_Wh(i, j) "
%Consumos(:, :, 4)=Factor de carga al inicio de cada desplazamiento[%]
%      ="SOC_In(i, j) "
%Consumos(:, :, 5)=Potencia disponible en batería al final de
%      de cada desplazamiento [Wh]
%      ="EstadoBFin_Wh(i, j) "
%Consumos(:, :, 6)=Factor de carga al final de cada desplazamiento[%]
%      ="SOC_Fin(i, j) "
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Imagen 16. Estructura de la matriz Consumos. Registra las necesidades de consumos de cada usuario de participante en la comunidad objeto de estudio.

```

%%% MATRIZ DE CARGAS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Cargas(:, :, 1)=Duración de la parada [horas]
%      ="TiempoParada(i, j) "
%Cargas(:, :, 2)=Potencia absorb por batería durante la parada[Wh]
%      ="PotAbsBat(i, j) "
%Cargas(:, :, 3)=Capacidad de la batería tras la parada [Wh]
%      ="PotBatDesp(i, j) "
%Cargas(:, :, 4)=Factor de carga de la batería tras la parada [%]
%      ="SOC_Desp(i, j) "
%Cargas(:, :, 5)=Potencia total aportada por puesto de carga [Wh]
%      ="PotRealCon(i, j) "
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Imagen 17. Estructura de la matriz Cargas. Registra la estrategia de carga seguida por cada usuario participante en la comunidad objeto de estudio.

3.4.2 USUARIOS PRIVADOS DE TIPO PROFESIONAL

De manera análoga al caso de usuarios privados de tipo profesional, la estructura básica que sigue el modelo se organiza en tres matrices: matriz de movilidad, matriz de consumos y matriz de cargas. El objetivo de ambas partes del programa es exactamente el mismo, realizar una estimación del consumo eléctrico asociado a una comunidad de VE. Pero debido a la marcada diferencia en el número de desplazamientos y ciertos hábitos y necesidades de movilidad, se ha considerado oportuno y necesario realizar esta división (personal y profesional). Aun así, la

estructura, organización e implementación de ambas partes del modelo son altamente similares, razón por la cual en esta parte de la memoria se obvia la explicación detallada de algunos aspectos para evitar la excesiva repetición.

Además de las citadas tres matrices multidimensionales, para estos usuarios también se elabora un registro de solicitudes a red y hora de las mismas, con el fin de poder elaborar sus curvas de demanda y presupuesto. Como se ha mencionado, la programación es muy similar a la del tipo privado personal, pero los valores obtenidos como resultado de la simulación sí mostraran diferencias significantes. Esto se debe a que la verdadera distinción entre un tipo y otro de usuario son los valores de entrada que les caracterizan, no tanto así los algoritmos de cálculo y las estimaciones derivadas. Ciertamente existen algunos datos de entrada que se usan de forma común para ambos tipos de usuario, como se detalla en su momento.

3.4.2.1 MATRIZ DE MOVILIDAD PROFESIONAL

Como se explicó en el apartado anterior, para el caso de usuarios de tipo profesional no se realiza distinción de motivo entre desplazamiento. Se considera usuario profesional al que realiza siete o más desplazamientos en un mismo día, como puede ser el caso de empleados de servicio técnico, comerciales o repartidos. Todos ellos serán considerados solo en su ámbito laboral. El objetivo del programa es el cálculo de consumos de los vehículos, con lo cual el protagonismo recae en estos. Si bien es verdad que en todo momento se hace referencia a los usuarios en sí, esto es debido a la influencia fundamental de las características y necesidades de movilidad de los mismos en el consumo de los propios vehículos, además de una cuestión de personalización del asunto. Por tanto, se centra el estudio de los usuarios profesionales a los desplazamientos que realizan por motivo laboral y entre estos no existe diferencia significativa que marque distinción de motivo, al contrario de lo que ocurre con un usuario privado personal que puede ir a trabajar y luego a visitar a un familiar.

Con esto, el primer dato de relleno de la matriz de movilidad será la hora de inicio del desplazamiento i del usuario profesional j , $InicioDP(i,j)$. De manera análoga al caso anterior, se asigna el inicio de manera pseudoaleatoria mediante la probabilidad acumulada y los datos de la misma para este tipo de usuario.

La determinación de la longitud de cada desplazamiento, $LongitudDP(i,j)$, sigue exactamente el mismo procedimiento que para el caso anterior, ya que se alimenta la distribución de tipo

exponencial con el valor medio de longitud por desplazamiento y día, siendo tal valor común para ambos, como puede observarse en Imagen 18. Como se detalla en el apartado 3.4.1, ese dato ha sido calculado teniendo en cuenta los valores de longitud media para cada tipo de desplazamiento, interno o externo, y su probabilidad de ocurrencia en la comunidad de estudio según el día de simulación. Asignada $LongitudDP(i,j)$, se clasifica el tipo de desplazamiento bajo las mismas consideraciones anteriores, a saber:

- Si $LongitudDP(i,j) < LongitudLimite$: el desplazamiento es interno. Se le asigna el valor de velocidad promedio correspondiente a este tipo de desplazamientos, $V_{Interno}$.
- Si $LongitudDP(i,j) > LongitudLimite$: el desplazamiento es externo. Se le asigna el valor de velocidad promedio correspondiente a este tipo de desplazamientos, $V_{Externo}$.

La longitud que delimita entre desplazamiento interno y externo así como las velocidades para ambos tipos de desplazamiento se consideran las mismas para ambos tipo de usuario.

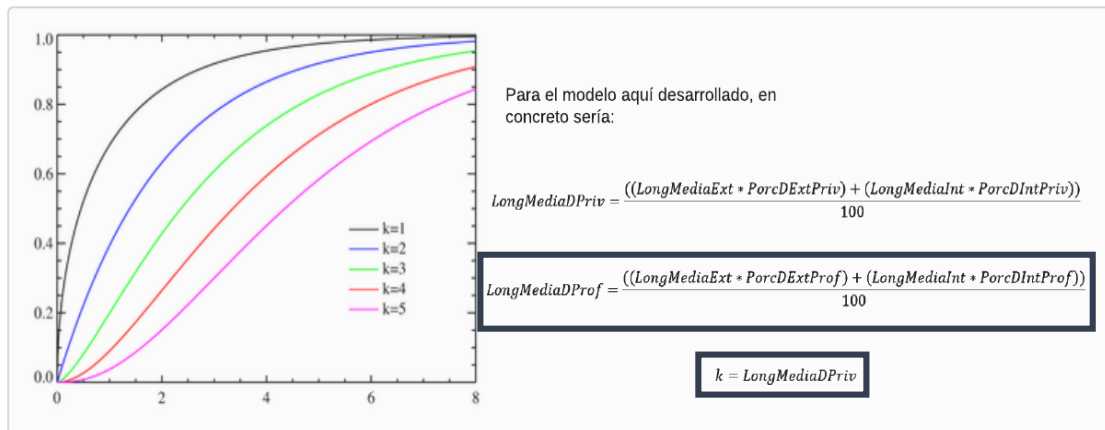


Imagen 18. Distribución exponencial, para la generación de la longitud de cada desplazamiento realizado por cada usuario de tipo privado profesional de la comunidad objeto de estudio.

Una vez conocida la longitud del desplazamiento i del usuario j , $LongitudDP(i,j)$, y asignada la velocidad promedio en función de esta, el cálculo de la duración del mismo, $DuracionDPP(i,j)$, es inmediato. Con $InicioDP(i,j)$ y $DuracionDP(i,j)$, el programa determina la hora de finalización del citado desplazamiento de ese usuario, $FinDP(i,j)$. De esta manera quedaría completada la matriz de movilidad profesional, con las características y necesidades de movilidad que se ajustan a este tipo de usuarios.

Nuevamente el programa asegura en todo momento que ningún desplazamiento finaliza más tarde de las doce de la madrugada del día simulado y, por extensión, tampoco existe

desplazamiento que se inicie a esa hora. La matriz en su conjunto está ordenada, para cada usuario, en función de las horas de inicio de los desplazamientos de este. Queda excluida también la posibilidad de que se generen dos desplazamientos para un mismo usuario j a la misma hora o que se solapen desplazamientos, es decir, no es posible que se inicie un desplazamiento sin haberse finalizado previamente el anterior. Atendiendo al registro de hora de inicio y fin se crea un vector que será de crucial importancia a la hora de caracterizar las cargas o incluso a la hora de decidirse por la realización de una carga o no, este es el tiempo entre desplazamiento. Este aspecto se tratará con más detalle en apartados sucesivos.

3.4.2.2 MATRIZ DE CONSUMOS PROFESIONAL

Definidos los patrones de movilidad de cada usuario profesional j , se procede a elaborar la previsión de consumo eléctrico de cada uno para cada desplazamiento i . Pero previo a esto, se le asigna a cada usuario j un modelo de VE mP . El catálogo de vehículo registrado para usuarios de tipo profesional recoge los modelos más representativos del mercado que mejor se adaptan al marco de profesiones consideradas, así pues se tiene un modelo de VE pequeño, un modelo de furgoneta eléctrica y otro modelo de furgón eléctrico. Para cada uno de ellos, y de manera análoga al caso anterior, se registra su consumo, $ConsumoVE_Prof(mP)$, y la capacidad de su batería, $CapacidadBateriaProf(mP)$.

Sigue siendo para estos usuarios de vital importancia que se asegure el nivel de batería suficiente para completar la totalidad del desplazamiento que se esté realizando, no quedándose sin batería en mitad del mismo. Con este objeto, se vuelven a analizar las necesidades de movilidad del conjunto de usuarios profesionales de la comunidad y a dimensionar el caso más conservador. Este vuelve a ser el que corresponde al desplazamiento de mayor longitud, $LongMaxP$, realizado con el VE de mayor. Se saca con ello el nivel de batería que requiere tal desplazamiento, $ConsumoMaxP$, el cual se tendrá en cuenta para la caracterización de la elección de carga que asegure, como ya se ha mencionado, que el usuario disponga de un nivel de batería suficiente para asumir dicho desplazamiento tras la parada. Esto es analizado en paralelo con el tiempo disponible para la posible carga, $TiempoParadaP(i,j)$, que no es más que el tiempo entre desplazamientos.

Llegado este punto se da comienzo al cálculo de consumo asociado a cada desplazamiento i de cada usuario profesional j , $ConsumoDP_Wh(i,j)$, en función de la $LongitudDP(i,j)$ y del

ConsumoVE_Prof(mP). Teniendo en cuenta *CapacidadBateriaProf(mP)*, se extrae el equivalente expresado en tanto por ciento de batería, *ConsumoDP_%(i,j)*. De igual manera que para privado persona, se analiza el SOC al inicio del desplazamiento para, junto con el consumo individual de desplazamiento obtener el estado de la batería al finalizar el citado desplazamiento.

La matriz se actualiza en cada iteración del sistema en función de las elecciones de carga o no carga y del modo de carga que se lleve a cabo, en su caso, así como del tiempo de duración de la misma. Es decir, según se avanza en el proceso de generación de la matriz de carga, la de consumo se va modificando acorde con esta, asegurando la concordancia de datos en todo momento.

3.4.2.3 MATRIZ DE CARGAS PROFESIONAL

El proceso de elaboración de esta matriz es completamente análogo al seguido en el caso de usuarios privados personales, pero adaptándolo a los datos específicos de este conjunto. Así pues, se toman las mismas consideraciones e hipótesis y se analizan las mismas situaciones para la determinación de la elección de carga/no carga y el modo así como para su dimensionamiento. Por esta razón no se vuelve a explicar el proceso en este apartado.

Nuevamente en cada iteración se toman registros de la potencia real demandada a la red y la hora y el modo en que dicha demanda fue realizada, con el objeto de poder disponer de los datos necesarios para la elaboración de curvas de demanda horaria según tipo de usuario y modo de carga. Así mismo, se dispondrá de datos para la estimación del coste asociado a cada desplazamiento de cada usuario, con los que poder realizar un presupuesto estimado diario de movilidad con VE.

Nuevamente se asume que tras su último desplazamiento para el día simulado, *MaxDProfesionales*, todo VE ha llegado a su lugar de estacionamiento habitual. Aquí se realizará una carga lenta doméstica completa al 100% de *CapacidadBateriaProf(mP)*. Los valores de energía demandada y hora de demanda de esta última carga también quedan registrados en la correspondiente matriz. Pero para este caso, se realizará un análisis más detallado de la hora de carga, de manera que se contempla la posibilidad, atendiendo a la tarifa eléctrica, de desplazar la citada carga a horas valle de forma tal que los beneficios reviertan tanto en usuario como en sistema.

3.4.2.4 CONCLUSIÓN

Con esto queda caracterizado el comportamiento de cada usuario j de tipo privado profesional perteneciente a la comunidad objeto de estudio, para cada desplazamiento i del día simulado. En las tres imágenes adjuntas (Imagen 19, Imagen 20 y Imagen 21) queda reflejado como se almacenan los datos de movilidad, consumos y cargas en el programa. Estas, al igual que en el caso de usuarios privados personales, son de carácter multidimensional con número de “capas” variable en función del número de desplazamiento por día realizados por un usuario j de tipo privado profesional.

```

%%% MATRIZ DE MOVILIDAD %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%MovilidadP(:, :, 1)=Motivo desplazamiento tipo profesional
%
%="MotivoDP(i, j)"
%MovilidadP(:, :, 2)=Hora de inicio de cada desplazamiento [horas]
%
%="InicioDP(i, j)"
%MovilidadP(:, :, 3)=Longitud de cada desplazamiento en [Km]
%
%="LongitudDP(i, j)"
%MovilidadP(:, :, 4)=Duración de cada desplazamiento en [horas]
%
%="DuraciónDP(i, j)"
%MovilidadP(:, :, 5)=Hora de fin de cada desplazamiento [horas]
%
%="FinDP(i, j)"
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Imagen 19. Estructura de la matriz MovilidadP. Registra e perfil de movilidad de todos los usuarios de tipo profesional participantes en la comunidad objeto de estudio.

```

%%% MATRIZ DE CONSUMOS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ConsumosP(:, :, 1)=Consumo de cada desplazamiento individual [Wh]
%
%="ConsumoDP_Wh(i, j)"
%ConsumosP(:, :, 2)=Consumo de batería de cada desp individual [%]
%
%="ConsumoDP_%(i, j)"
%ConsumosP(:, :, 3)=Potencia disponible en la batería al inicio
%
%de cada desplazamiento [Wh]
%
%="EstadoBInP_Wh(i, j)"
%ConsumosP(:, :, 4)=Factor de carga al inicio de cada desplazamiento
%
%="SOC_InP(i, j)"
%ConsumosP(:, :, 5)=Potencia disponible en batería al final de
%
%de cada desplazamiento [Wh]
%
%="EstadoBFinP_Wh(i, j)"
%ConsumosP(:, :, 6)=Factor de carga al final de cada desplazamiento
%
%="SOC_FinP(i, j)"
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Imagen 20. Estructura de la matriz ConsumosP. Registra las necesidades de consumo de todos los usuarios de tipo profesional participantes en la comunidad objeto de estudio.

```

%%% MATRIZ DE CARGAS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%CargasP(:, :, 1)=Duración de la parada [horas]
%
%="TiempoParadaP(i, j) "
%CargasP(:, :, 2)=Potencia absorb por batería durante la parada [Wh]
%
%="PotAbsBatP(i, j) "
%CargasP(:, :, 3)=Capacidad de la batería tras la parada [Wh]
%
%="PotBatDespP(i, j) "
%CargasP(:, :, 4)=Factor de carga de la batería tras la parada [%]
%
%="SOC_DespP(i, j) "
%CargasP(:, :, 5)=Potencia total aportada por puesto de carga [Wh]
%
%="PotRealConP(i, j) "
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Imagen 21. Estructura de la matriz *CargasP*. Registra la estrategia de carga de todos los usuarios de tipo profesional participantes en la comunidad objeto de estudio.

3.4.3 TOTALIZACIÓN DE RESULTADOS

Tras las iteraciones oportunas, adaptadas a los requerimientos de la sociedad objeto de la simulación, y una vez se dispone de las matrices de movilidad, consumos y cargas para ambos conjunto de usuarios, se procede al recuento de valores y a la totalización de la estimación de consumo. Como resultados globales totalizados el programa aporta el consumo eléctrico estimado para la totalidad de usuarios privados personales, *ConsumoTotalPriv*, y el asociado a los privados profesionales, *ConsumoTotalProf*, así como el consumo eléctrico total previsto para la comunidad objeto de estudio, *ConsumoTotal*, independientemente del tipo de usuario y para un día completo de simulación.

Por otro lado, se elaboran las matrices que registran los datos de solicitudes de electricidad a la red, *CurvaDemanda(i,j,1)*, y las horas, *Curva Demanda(i,j,2)*, de cada una de ellas, con las que se elaboran las curvas de demanda. Nuevamente se hace una para cada tipo de usuario y otra con los valores totales.

Por último, con los costes generados en la simulación, en función de las cargas realizadas se elaboran dos tipos de presupuesto de movilidad con VE para usuario del mismo. Carece de sentido un presupuesto global para una comunidad, cada usuario pagará por su VE, y en caso de ser propiedad de una compañía privada, el interés de la misma estará centrado en conocer lo que le cuesta cada uno de los vehículos que componen su flota. Siguiendo este razonamiento, se elabora un presupuesto por usuario y se extrae de ello el presupuesto medio por usuario referente a la movilidad eléctrica para un día en función del tipo de usuario: privado personal o privado profesional. Además, de cara a los coste, se hace distinción entre presupuesto elaborado según tarifa sin discriminación horaria, para el cual es indiferente la hora a la que se efectúa

cada solicitud a red, y otro acorde a una tarifa en la que sí aplica la discriminación horaria. Las tarifas con discriminación horaria hacen distinción entre precio de energía consumida en horas valle y precio de energía consumida en horas pico. Para ello, existen unos intervalos de horas prefijados definidos Valle y otros Pico, atendiendo a si la demanda se produce en verano o en invierno. La Tabla 3 se muestra un cuadro con los precios de energía y los intervalos de horas valle y pico para una tarifa con discriminación horaria. Así pues, para la elaboración del presupuesto con tarifa con discriminación horaria, igualmente importante es conocer la cantidad de energía solicitado como la hora a la que se solicitó y la época del año del día simulado.

Será en el capítulo siguiente donde se aporten ejemplos de tales registros, basados en los resultados obtenidos tras la simulación de una comunidad modelo de prueba.

TRAMO HORARIO	NÚMERO DE HORAS	HORARIO DE APLICACIÓN
Horas Pico	10 horas/día	Invierno: de 12h a 22h Verano: de 13h a 23h
Horas Valle	14 horas/día	Invierno: de 22h a 12h Verano: de 23h a 13h

Tabla 3. Características de la tarifa eléctrica con discriminación horaria

A continuación se adjunta la en la cual puede verse cómo el programa registra, en cada carga que realiza el usuario j, el coste asociado a la misma, en función de si aplica tarifa sin o con discriminación horaria.

```

%COSTE ASOCIADOS A LA MOVILIDAD CON VE
%Coste sin discriminación horaria
PrecioTotEnSinDis=CosteEnergiaSinDis*(1+ImpuestosElect);
CosteParadaSD(i,j)=Cargas(i,j,5)*PrecioTotEnSinDis;
%Toda la potencia que sale del puesto, no la que realmente
%llega a la bat porque es por la que cobra la compañía

%Coste con discriminacion horaria
%Hora Punta
if Movilidad(i,j,5)>HoraMin && Movilidad(i,j,5)<HoraMax;
    PrecioTotEnPunta=CosteEnergiaConDisPunta*(1+ImpuestosElect);
    CosteParadaCD(i,j)=Cargas(i,j,5)*PrecioTotEnPunta;
    %Toda la potencia que sale del puesto, no la que realmente
    %llega a la bat porque es por la que cobra la compañía

%Hora Valle
else
    PrecioTotEnValle=CosteEnergiaConDisValle*(1+ImpuestosElect);
    CosteParadaCD(i,j)=Cargas(i,j,5)*PrecioTotEnValle;
    %Toda la potencia que sale del puesto, no la que realmente
    %llega a la bat porque es por la que cobra la compañía
end
%Incluidos Impuesto Especial Electricidad pero SIN IVA
    
```

Imagen 22. Cálculo del coste asociado a cada parada realizada por cada usuario participante en la comunidad objeto de estudio. Código fuente.

CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN UNA COMUNIDAD DE PRUEBA. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En este capítulo se implementa el modelo elaborado utilizando datos reales, con el objeto de extraer valores de la simulación que puedan ser analizados, además de poder demostrar el correcto funcionamiento del algoritmo. En primer lugar se exponen las fuentes de datos utilizadas para extraer los valores de entrada de los que el programa hace uso, así mismo se adjuntan tablas y explicaciones de tales datos junto con justificaciones de las elecciones tomadas y deducciones elaboradas. Seguidamente se muestran los resultados de la simulación obtenidos, nuevamente todos ellos analizados y aclarados. La exposición de los resultados se ha estructurado en dos conjuntos. Por un lado, se tienen los valores de las variables que caracterizan a la comunidad simulada, susceptibles de ser comparados con los de las variables dato de entrada, a fin de poder comprobar que el modelo de simulación sigue de cerca la realidad que se le ha indicado. Por otro lado están los valores propiamente objeto de la citada simulación, es decir, las previsiones de demanda eléctrica total atendiendo al tipo de usuario que realiza el desplazamiento y el modo de carga seleccionado, junto con los consumos y el coste de la movilidad en VE. Para finalizar el capítulo, se hace un análisis del impacto que llega a tener en la curva de demanda el tipo de estrategia de carga seguido por los usuarios de VE, lo cual se ha considerado interesante de cara a la futura implementación de esta tecnología en las ciudades debido a los efectos que las diferentes formas de demanda pueden generar en la red de distribución en la cual se conecten los VE.

Siguiendo la estructura general del trabajo, para la recapitulación de datos reales se han analizado tres tipos de bases de datos: las relativas a movilidad, para lo cual se ha hecho uso de encuestas y datos de movilidad registrados por las autoridades del transporte de las diferentes comunidades españolas; las relativas a modelos de VE y sus características técnicas, recurriendo a catálogos elaborados por los propios fabricantes; y las relacionadas con las cargas y las tarifas eléctricas aplicables, haciendo uso de normativas y legislaciones gubernamentales así como de datos aportados por las compañías eléctricas.

4.1 DATOS DE ENTRADA Y CÁLCULOS PREVIOS.

Como se sabe, con el presente estudio se pretende aportar los valores necesarios que permitan dimensionar el impacto que una determinada comunidad de VE puede tener en la red de distribución oportuna para la zona de análisis. Es obvio que la dimensión de tal impacto está íntimamente ligada al número de VEs participantes, razón por la cual se ha decidido fijar esta variable como variable de iniciación para el modelo. De esta manera se permite ir analizando el crecimiento de demanda acorde al incremento en el número de VEs presentes en la comunidad. Por otra parte, se define un vector de tiempo de simulación correspondiente a las 24 horas de un día.

4.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL PERFIL DE MOVILIDAD

A fin de crear perfiles de movilidad para los usuarios participantes en la comunidad simulada, se busca una base de referencias reales para una ciudad del territorio nacional de la que extraer los datos de entrada necesarios para el funcionamiento del programa. Como se ha explicado, se carece de cifras reales de usuarios de VE que utilizar y es por ello que se ha optado por recurrir a las de usuarios de VCI, asumiendo que los hábitos de movilidad entre unos y otros serán altamente semejantes, al menos en los primeros años de implementación de la nueva tecnología.

Finalmente se ha optado por extraer los datos de las Encuestas de Movilidad Cotidiana (EMQ, Enquesta de Mobilitat Quotidiana), aportadas por la Autoridad del Transporte Metropolitano del Área de Barcelona (ATM, Autoritat del Transport Metropolità). La ATM llevó a cabo en el año 2006 una serie de encuestas y recogidas de datos referentes a la movilidad urbana para el área territorial de Cataluña muy detalladas y contundentes [42]. Debido a la riqueza de referencias que en ellas se aportan se decidió seleccionar esta base de datos, de entre todas las analizadas en el proceso de búsqueda.

Como se ha mencionado, el alcance del trabajo aquí descrito se limita al estudio de usuarios residentes en áreas urbanas, es decir, a la movilidad en tal foco. Por esta razón, de entre todos los documentos disponibles en las EMQ, se han ido extrayendo aquellos datos referentes solo a la movilidad cotidiana de área urbana y barrios y pueblos de la periferia cercanos. Así mismo,

algunos de los datos se han adaptado o modificado en función a las necesidades concretas de este modelo, siempre manteniendo un enfoque lo más realista posible.

Así, con los datos de movilidad que se ha de alimentar al programa, quedan caracterizados los hábitos y las necesidades de los usuarios de VE de esta comunidad. El programa simula un perfil de movilidad para cada uno de los usuarios registrados, en base a los datos introducidos. A continuación se exponen de manera detallada los conjuntos de valores que se han tomado para introducirlos en el modelo elaborado.

4.1.1.1 NÚMERO DE DESPLAZAMIENTOS MEDIO POR PERSONA Y DÍA

En primer lugar se aportan las cifras referentes al número de desplazamientos medio por usuario para un día. Tras el análisis de los documentos mencionados anteriormente y focalizando el estudio en un día entre semana, se toma por válido asumir que el número medio de desplazamientos por persona y día para usuarios de tipo privado personal es de 3.31, donde se incluye sin distinción los realizados por motivo personal y aquellos por motivo ocupacional. Para los usuarios de tipo privado profesional, tal cifra asciende a 15.11 desplazamientos por usuario y día. Como se ha explicado, estos datos corresponden a movilidad con VCI e incluyen dentro de profesionales, aquellos dedicados al transporte de personal en ámbito público y privado. En este trabajo se excluye tal categoría de agentes profesionales, viéndose obviamente reducido el número de desplazamientos diarios por usuario al extrapolarlo al conjunto de agentes deseado, pasando a estar en el entorno de los 8.50. En cuanto al porcentaje de población perteneciente a cada tipo para un día como el considerado, se cifra el mismo en un 90% para el primer tipo, aquellos usuarios privados personales, y un 10% para el segundo, los profesionales. En la Tabla 4 quedan definidos los valores usados en la implementación, acorde al tipo de usuario representado. En el esquema de la Imagen 6, aportado en el Capítulo 3, quedan definidas las variables de entrada cuyos valores se han de introducir en el programa, que para este apartado son todas las incluidas en la citada Tabla 4, a excepción del valor remarcado en negrita que es el calculado por el programa. Con todo ello, el número de desplazamientos medio por usuario para el día de simulación, independientemente del tipo de usuario, es de 4.49 desplazamientos.

TIPO DE USUARIO	CARACTERÍSTICA PARA CLASIF	%DE PARTICIPACIÓN	RATIO DESPL/PERS,DÍA
Privado Personal	< 7 despl/día	90%	3.31
Privado Profesional	>= 7 despl/día	10%	15.11
NÚMERO MEDIA DE DESPLAZAMIENTO POR USUARIO			4.49

Tabla 4. Número de desplazamientos medio por usuario. Clasificación de los dos conjuntos de usuarios considerados.

Con el número medio de desplazamiento por usuario y día, independientemente del tipo de usuario que se analice, se alimenta la distribución de Poisson, como valor λ de la misma, mediante la cual se asigna un número de desplazamientos a cada usuario considerado, comenzándose así la simulación del perfil de movilidad de cada uno de ellos. En función de este número, de valor entero y carácter pseudoaleatorio, se identifica el tipo de usuario y se divide la comunidad en dos conjunto: usuarios que realizan menos de 7 desplazamientos y usuarios que realizan 7 o más. En la Tabla 4, junto con los datos representativos de cada conjunto, se expone dicha característica de clasificación.

En caso de que durante este paso de la simulación a un usuario le sean asignados 0 o 1 desplazamientos, el programa realiza una corrección de manera tal que se garantice que como mínimo todo usuario realizará dos desplazamientos, permitiéndosele volver a su lugar de aparcamiento habitual.

4.1.1.2 DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LOS DESPLAZAMIENTOS

Una dimensión de interés especial a estudiar en movilidad es la temporal, es decir, la distribución horaria de los desplazamientos y la duración media de los mismos. En este apartado se trata la primera parte. Esta distribución depende, de manera clara, tanto del tipo de usuario que realiza el desplazamiento como del motivo por el cual se realiza. La fuente utilizada como base de datos hace distinción, dentro de los motivos para usuarios privados personales, entre ocupacionales y personales y sus correspondientes regresos a casa. En el presente trabajo se aglutinan el motivo ocupacional y su correspondiente regreso a casa en un mismo grupo, procediendo de manera análoga con el motivo personal. Se considera que no aporta hecho relevante el separar los datos de regreso a casa, por lo que se asume por válida la simplificación de introducir estos dentro de los del motivo correspondiente.

En la Imagen 23 se pueden apreciar las gráficas representativas de la distribución horaria de los desplazamientos realizados a lo largo de un día por los usuarios de la comunidad objeto de

estudio, según los datos introducidos en el programa. A la izquierda puede apreciarse tal distribución en función del tipo de usuario que realiza el desplazamiento, para los dos tipos considerados en este modelo: privado personal y privado profesional. En la gráfica de la derecha queda desglosada la distribución horaria correspondiente a los desplazamientos realizados por usuarios privados de tipo personal en función del motivo por el cual realizan el mismo, para los dos motivos considerados aquí: motivo personal y motivo ocupacional.

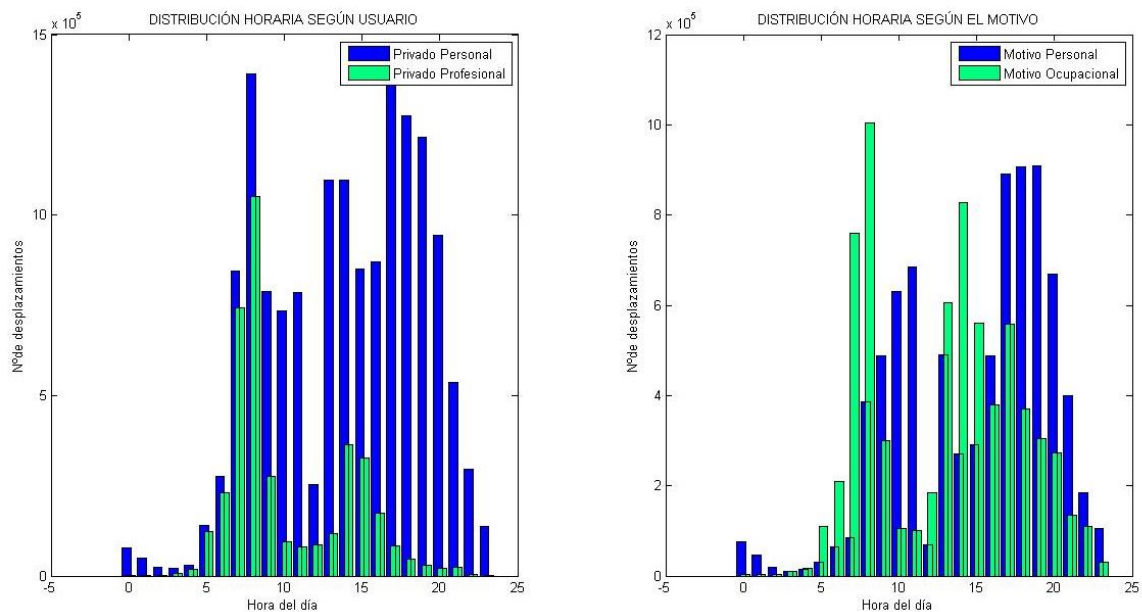


Imagen 23. Distribución horaria de los desplazamientos en función del tipo de usuario (izquierda) y del motivo del desplazamiento (derecha). Datos reales [42].

Puede observarse que todas presentan una marcada tendencia, específica para el tipo de usuario y caracterizada por un conjunto de horas de elevada concentración de desplazamientos. Dicha concentración tiene lugar para la franja horaria de 7:00 a 9:00 de la mañana, con un pico muy pronunciado en torno las 8:00, y nuevamente entre 13:00 y 15:00, para el caso de usuario profesional. Para el caso de los agentes privados personales, se da igualmente de 7:00 a 9:00 de la mañana, con el pico en torno las 8:00, pero en este caso se producen dos nuevos pico de concentración de desplazamientos, a las 13:00-14:00 y el último entre las 17:00 y 19:00 horas. Es mayoritaria la movilidad en la franja horaria de primera hora de la mañana, de 7:00 a 8:00, para aquellos realizados por motivo ocupacional, mientras que se centra más en los intervalos de horas de tarde, entre 17:00 y 19:00, cuando estos son realizados por motivo personal. Así

mismo, existen horas de baja afluencia de desplazamientos con su máxima representación en las horas nocturnas y de madrugada, como es lógico.

Otro conjunto de datos interesante de analizar y que también aporta información en este sentido, es la probabilidad de ocurrencia de un desplazamiento a una hora determinada. Con los datos de probabilidades para las 24 horas del día analizado, se extrae la probabilidad acumulada que le servirá al programa para la asignación de una hora de inicio a cada desplazamiento de cada usuario, en función de tipo de usuario y del motivo por el cual se desplaza. En la Imagen 24 aparecen representados estos datos, siendo la gráfica de la izquierda la representación de la probabilidad de que ocurra un desplazamiento para cada hora del día y la de la derecha la probabilidad acumulada de tales sucesos.

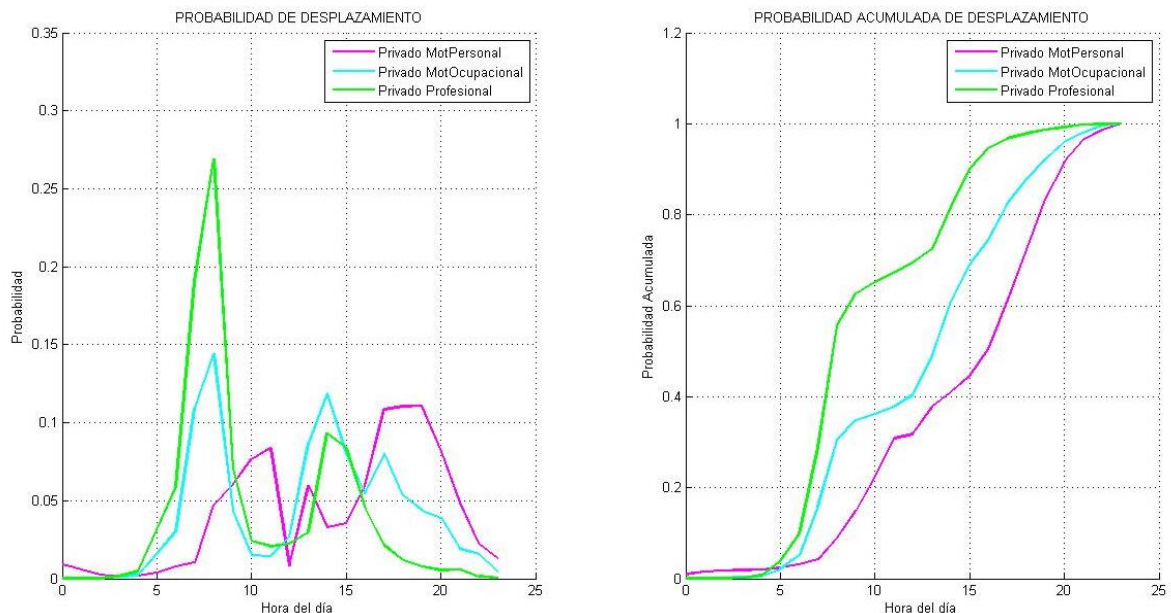


Imagen 24. Probabilidad horaria de desplazamiento (izquierda) y probabilidad acumulada (derecha) en función del tipo de usuario y del motivo del desplazamiento. Datos reales [42].

4.1.1.3 DURACIÓN, VELOCIDAD Y LONGITUD MEDIAS DE DESPLAZAMIENTO

Según los datos de las bases consultadas, la duración media de un desplazamiento en un día de diario para la zona estudiada es de 23.42 minutos, tiempo que varía significativamente en función del área geográfica ocupada por la comunidad que se estudie. Así pues, se cuantifica en 25.91 minutos la de un de tipo intermunicipal. Como es lógico, tales valores medios varían mucho en función de la extensión que abarque el estudio, es decir, si este se focaliza en la zona urbana y alrededores inmediatos a esta o si se tienen en cuenta las zonas interurbanas y pueblos

de las afueras, fuera estos de la región urbana metropolitana pero dentro del ámbito regional o comunitario.

En lo referente al asunto de las velocidades, como ya se explicó, es clara la relación existente entre la velocidad de circulación y el consumo del vehículo. La cuestión es que en el ámbito de los VE, los fabricantes aportan en los catálogos de especificaciones técnicas de cada modelo unos valores de consumo eléctrico del mismo, generalmente en kWh por cada 100km, deducidos para unas velocidades de circulación promedio. A falta de información detallada de la relación velocidad-consumo para cada modelo de VE objeto de análisis, en el programa se introducen como variables dato de entrada los de velocidad promedio asignados a cada tipo de desplazamiento, en función de la longitud del mismo, para los dos tipos aquí considerados: desplazamiento interno y desplazamiento externo. Bien es cierto que estos valores, al encontrarse ubicados al inicio del programa, pueden ser modificados fácilmente en cualquier momentos según necesidades, permitiendo analizar la variación del consumo al aumentar o disminuir las citadas velocidades de circulación.

En base a las conclusiones extraídas del análisis de datos de las fuentes y documentos consultados y acorde con las hipótesis y suposiciones adoptadas para la elaboración del modelo desarrollado, se ha tomado por bueno el siguiente dimensionamiento de variables referentes al asunto de duraciones y velocidades. Estas quedan perfectamente divididas en dos grupos, el relativo a los datos específicos para desplazamientos internos y el correspondiente para desplazamientos externos. Se cuantifica la duración media de un desplazamiento externo en 35.1 minutos, asociándole una velocidad promedio de 58.5 km/h. Por su parte, el desplazamiento interno se ha caracterizado con una duración de 15.28 minutos y una velocidad de circulación promedio de 28.4 km/h.

Con estos datos de duraciones y velocidades el programa realiza el cálculo de longitudes medias por desplazamiento, haciendo distinción entre externo e interno y obteniendo unos valores de 34.22 km para el primero y de 7.23 km para el segundo. Se ha considerado, por otra parte y para ajustarse en mayor medida a una situación real, un porcentaje asociado a la probabilidad de ocurrencia de cada tipo de desplazamiento en función del tipo de usuario que lo realice. Así se tiene en cuenta el hecho de que, por norma, un usuario tipo privado personal realiza un mayor número de desplazamientos externos que uno profesional. En todo momento e independientemente del tipo de agente, son claramente mayoritarios los desplazamientos internos, con unos porcentajes de 95% y 90% para profesionales y personales, respectivamente.

Se deja así el porcentaje de externos cifrado en 5% y 10%, en el mismo orden. A modo de resumen aclaratorio, se adjunta la Tabla 5 con todos los valores de duraciones, velocidades y longitudes de los que se hace uso en la simulación del modelo, todos ellos han de ser introducido en el programa.

TIPO DE DESPLAZAMIENTO	Duración media [min]	Velocidad promedio [km/h]	Longitud media [km]
Externo	35.1	58.5	34.22
Interno	15.28	28.4	7.23

Tabla 5. Duración, velocidad y longitud media de desplazamiento. Datos reales.

Con las duraciones y las longitudes medias para desplazamiento interno y externo, junto con sus porcentajes de ocurrencia en función del tipo de usuario, se calcula la duración y la longitud medias asociadas a un desplazamiento en un día entre semana, en función del tipo de agente, calculadas de la siguiente manera:

USUARIO TIPO PRIVADO PERSONAL

$$DuracMediaDPriv = \frac{((DuracMediaDExt * PorcDExtPriv) + (DuracMediaDInt * PorcDIntPriv))}{100}$$

$$LongMediaDPriv = \frac{((LongMediaExt * PorcDExtPriv) + (LongMediaInt * PorcDIntPriv))}{100}$$

USUARIO TIPO PRIVADO PROFESIONAL

$$DuracMediaDProf = \frac{((DuracMediaDExt * PorcDExtProf) + (DuracMediaDInt * PorcDIntProf))}{100}$$

$$LongMediaDProf = \frac{((LongMediaExt * PorcDExtProf) + (LongMediaInt * PorcDIntProf))}{100}$$

Donde los valores de duraciones se introducen en horas, de longitudes en km y de participación en tanto por ciento. Al final de la memoria se incluye un glosario con los nombres de las variables

usadas en el código fuente y su descripción, en el Anexo I. En la Tabla 6 y la Tabla 7 aparecen reflejados los resultados de las operaciones anteriormente detalladas. Nuevamente todos los datos incluidos en estas tablas han de ser introducidos al programa para que simule la comunidad objeto de estudio, a excepción de los que aparecen remarcados en negrita que serán calculados por el mismo.

USUARIO TIPO PRIVADO PERSONAL

TIPO DE DESPLAZAMIENTO	Porcentaje [%]	Duración media [min]	Longitud media [km]
Externo	10%	35.1	34.22
Interno	90%	15.28	7.23
Usuario Privado Personal		17.26	9.94

Tabla 6. Duración y longitud media de desplazamiento en función del tipo de desplazamiento, para usuarios privado personal. Datos reales.

USUARIO TIPO PRIVADO PROFESIONAL

TIPO DE DESPLAZAMIENTO	Porcentaje [%]	Duración media [min]	Longitud media [km]
Externo	5%	35.1	34.22
Interno	95%	15.28	7.23
Usuario Privado Profesional		16.27	8.58

Tabla 7. Duración y longitud media de desplazamiento en función del tipo de desplazamiento, para usuarios privado profesional. Datos reales.

El programa hace uso de los resultados referentes a longitudes, haciendo distinción entre tipos de agentes, como valor k de la distribución de tipo exponencial, mediante la cual se asignara la longitud relativa a cada desplazamiento realizado por cada usuario de la comunidad simulada, atendiendo al tipo correspondiente. Tras la citada asignación de longitudes, cada desplazamiento es clasificado como externo o interno acorde a un valor de longitud límite que delimita ambos tipos. Este valor de longitud límite ha de ser coherente con la extensión de terreno abarcada por la comunidad objeto de estudio. Para este caso, en consonancia con el alcance del estudio y la categorización de tipo de desplazamiento y duraciones y velocidades empleada, se cuantifica en 15km.

4.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS DE VE

En el programa se elabora un pequeño catálogo de tres modelos de VE para cada tipo de usuarios, de manera tal que en la simulación se tengan en cuentas distintas características de VE, añadiendo así más realismo a la misma. Se ha optado por tres modelos de cada tipo ya que se considera que es el número necesario que deja cubiertas las principales opciones referentes a usuarios profesionales: coche pequeño para servicio técnico y similar, furgoneta media y furgón de mayor tamaño. Queriendo usar el mismo número de modelos disponibles para ambos conjunto, se extiende esta cifra de tres modelos diferentes al catálogo para privados personales. Tal asunción llega también tras la valoración de las características de los modelos actualmente presentes en el mercado y concluir que no existe diferencia contundente entre modelos que lleve a decantarse por elaborar un catálogo mayor para un primer análisis como este.

La selección de los vehículos se ha llevado a cabo tras analizar las cifras de ventas del parque automovilístico eléctrico, escogiéndose los modelos más vendidos y siempre asegurando características técnicas diferentes. En cuanto a estas, el programa hace uso del consumo del vehículo en concreto y de la capacidad de su batería, al ser las más relevantes para el objeto buscado: estimación del consumo considerando posibilidad de carga. Así con todo, en la Tabla 8 se detallan los modelos escogidos y sus características asociadas, que corresponden a las variables dato con las que se alimenta el modelo para la simulación, para aquellos usuarios de tipo privado personal. De manera análoga, la Tabla 9 presenta el catálogo de VE para el conjunto de agentes profesionales. Todos los datos aquí detallados han de ser introducidos en el programa para que haga uso de ellos.

VEHÍCULOS ELÉCTRICOS PARA USUARIOS DE TIPO PRIVADO PERSONAL

MARCA	MODELO	CATEGORÍA	CONSUMO [Wh/km]	CAPACIDAD BATERÍA [kWh]
Renault	ZOE	Turismo M1	133	22
BMW	I3	Turismo M1	129	21.6
Nissan	Leaf	Turismo M1	150	24

Tabla 8. Catálogo de modelos de VE para usuarios privados personales considerados en el programa elaborado para la comunidad objeto de estudio. Datos reales [15].

VEHÍCULOS ELÉCTRICOS PARA USUARIOS DE TIPO PRIVADO PROFESIONAL

MARCA	MODELO	CATEGORÍA	CONSUMO [Wh/km]	CAPACIDAD BATERÍA [kWh]
Smart	ForTwo Electric Drive	Turismo M1	151	17
Nissan	e-NV200	Furgoneta N1	165	24
Peugeot	Partner	Furgón N1	177	22.5

Tabla 9. Catálogo de modelos de VE para usuarios privados profesionales considerados en el programa elaborado para la comunidad objeto de estudio. Datos reales [15].

Una vez dispone del catálogo detallado de modelos de VE que intervendrán en la comunidad a estudiar, el programa realiza una estimación del desplazamiento más exigente y del menos exigente, desde el punto de vista de la red de distribución. Consiste en el dimensionamiento de aquel desplazamiento que supone un mayor consumo de energía eléctrica, el de mayor longitud realizado con el VE de mayor consumo por km, y del que supone menor consumo, el de menor longitud llevado a cabo por el VE de menor consumo eléctrico asociado. Ambos extremos son dimensionados para cada conjunto de usuarios. Tales cálculos son utilizados por el programa para analizar situaciones de parada y elaborar decisiones de carga o no carga así como de modo de carga, de manera que se asegure en todo momento la autonomía suficiente que garantice el poder completar todo desplazamiento que el usuario realice. Siguiendo este objetivo, se toma la decisión de elaborar la elección del modo de carga haciendo comparativa entre la potencia que se puede adquirir durante el tiempo de parada y el caso más conservador, como se explica más adelante.

4.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS MODOS DE CARGA Y LA TARIFA ELÉCTRICA

Como último conjunto de datos de entrada necesarios para la simulación del modelo, están los referentes a la carga y al coste de la energía consumida. Las cifras introducidas al programa han sido seleccionadas siguiendo la normativa legal correspondiente, al ser estos valores reconocidos y regulados oficialmente por los gobiernos.

4.1.3.1 MODOS DE CARGA

El modelo elaborado reconoce dos modos de carga: lenta y rápida. Si bien es cierto que se da más prioridad en todo momento a la carga lenta, considerándola la más común y la más beneficiosa tanto desde el punto de vista de la red como del usuario, se ha considerado necesario incluir la carga en modo rápido como salvoconducto en caso de urgencia o situación límite de autonomía y tiempo disponible para carga, ya que permite adquirir el 80% de la batería en unos 20 minutos.

Como se detalla en el apartado 2.1.4, la normativa vigente distingue cuatro modos de carga, siendo tres de ellos versiones diferentes del modo de carga lenta. Con objeto de simplificar, se ha tenido por bueno aglutinar los tres modos diferentes de carga lenta en uno único, haciendo uso de los valores, según normativa legal vigente, más comunes. Para la caracterización de tales modos, se le introduce al programa las referencias de tensión e intensidad propias del punto de carga considerado, así como el factor de pérdidas que lleva asociada su tecnología. En función de esto, el programa cifra la potencia que tal punto es capaz de aportar al VE enchufado. Se hace distinción clara entre la potencia teórica, sin tener en cuenta las pérdidas y por la cual se paga a la compañía, y la potencia real, la que verdaderamente le llega a la batería del VE.

En la Tabla 10 adjuntada a continuación, se especifican los parámetros de tensión y corriente que caracterizan cada modo de carga y de los que se hace uso como variables dato del modelo. Todos los valores aquí detallados se han de aportar al programa para que deje caracterizados los modos de carga existentes en la comunidad objeto de estudio.

MODO	TENSIÓN [V]	CORRIENTE [A]	FACTOR DE PÉRDIDAS [%]
Carga Lenta	230	16	15
Carga Rápida	400	125	15

Tabla 10. Tensión, intensidad y pérdidas propios de los puestos de recarga, en función del modo de carga, de la comunidad objeto de estudio. Datos reales.

4.1.3.2 TARIFAS ELÉCTRICAS

Para la estimación del coste en energía eléctrica consumida asociada a la movilidad con VE, se ha asumido la aplicación del nuevo sistema para la determinación del coste de la energía de la factura de la electricidad, según lo establecido en Real Decreto 216/2014 de 28 de marzo [71] y que se prevé entre en vigor a partir del 1 de julio de 2015, para todos aquellos consumidores acogidos al denominado Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC), estimados en unos 17 millones. Según normativa legal vigente, el coste de la energía se calcula tomando como referencia el precio del kW en función de su cotización diaria en el mercado mayorista. Se trata pues de un valor cambiante y es por ello que el presupuesto aportado en esta memoria es meramente orientativo. Se ha introducido para su estimación, un valor real de energía consumida registrado un día en concreto.

En el citado coste de la energía, existe una clarísima diferencia entre lo aplicable según la tarifa sin discriminación horaria y la tarifa con discriminación horaria. Es cierto que en vistas a la implantación de los VEs en nuestras ciudades, el tipo de tarifa eléctrica más razonable es aquella que aplica la discriminación horaria, buscando incentivar a los usuarios a realizar sus cargas en horas valle, siempre que el nivel de autonomía así lo permita. El fin último de esto es lograr un aplanamiento de la curva de demanda diaria, contribuyendo a la mayor eficiencia del sector eléctrico. Aun así, muchos usuarios no cuentan aún en sus hogares con el contador inteligente necesario para el buen establecimiento de la mencionada discriminación horaria. Por esta razón y para cubrir el mayor ámbito de posibilidades, en el presente trabajo se ha optado por la elaboración del presupuesto diario de movilidad con VE para ambas alternativas.

Desde julio de 2008 la anterior tarifa nocturna quedó sustituida por la vigente tarifa con discriminación horaria (DH), en la cual se establece una ampliación del intervalo horario con descuento (horas valle), que pasa a ser de 14 horas, ampliando a cambio hasta un 20% el recargo aplicado al resto de horas (horas punta). Así pues, se entiende por tarifa con discriminación horaria a aquella en la cual el precio de la energía eléctrica varía a tenor de la hora del día en la cual se haga la solicitud de electricidad a la red. Este tipo de tarifa beneficia con una reducción de hasta un 55% del coste de la electricidad en las horas consideradas como valle mientras que, como se ha puntualizado anteriormente, penaliza aquellas solicitudes realizadas a red en las consideradas horas punta con un incremento de aproximadamente un 20% del coste de la energía consumida.

En las siguientes tablas, Tabla 11 y Tabla 12, quedan definidos los valores y características usados en la simulación del modelo, en función del tipo de tarifa seleccionada.

TARIFA SIN DISCRIMINACIÓN HORARIA

HORARIO DE APLICACIÓN	PRECIO DE LA ENERGÍA CONSUMIDA [€/kWh]
Día completo	0.142138

Tabla 11. Tarifa eléctrica sin discriminación horaria para la comunidad objeto de estudio. Datos reales.

TARIFA CON DISCRIMINACIÓN HORARIA

TRAMA HORARIO	NÚMERO DE HORAS	HORARIO DE APLICACIÓN	PRECIO DE LA ENERGÍA CONSUMIDA [€/kWh]
Hora punta	10 horas/día	Invierno: de 12h a 22h Verano: de 13h a 23h	0.172438
Hora valle	14 horas/día	Invierno: de 22h a 12h Verano: de 23h a 13h	0.060700

Tabla 12. Tarifa eléctrica con discriminación horaria para la comunidad objeto de estudio. Datos reales.

Además, se tiene en cuenta en la elaboración del presupuesto el Impuesto Especial sobre la Electricidad, resultado de la aplicación a un coeficiente de 1.05113 el 4.864% sobre los impuestos obtenidos de la potencia contratada y la energía consumida. Dicho impuesto tiene su origen en la imposición por parte de la UE a España de extraer el anterior recargo de 4,864%, pagado en la factura en concepto de ayudas a la minería, de la tarifa eléctrica. La base imponible del citado impuesto viene como resultado de la multiplicación de tal porcentaje por el factor mencionado de 1.05113 a fin de alcanzar la cuota equivalente a la que se obtendría mediante la metodología anterior. También se le aplica al coste de energía consumida el 21% de IVA.

4.2 RESULTADOS OBTENIDOS TRAS LA SIMULACIÓN.

A continuación se exponen los resultados obtenidos con la simulación del modelo elaborado en el presente trabajo, tras las iteraciones oportunas que aseguren datos realistas. En un primer momento se pueden observar los resultados de las variables que caracterizan la comunidad objeto de estudio, de manera que pueden ser comparados con los valores reales utilizados para la alimentación del modelo y cuyo análisis aporta una idea del grado en el cual el modelo se ajusta a la realidad buscada. Seguidamente se exponen los resultados relativos a la previsión de

demanda eléctrica para esta comunidad así como los consumos totales, cuya obtención es el foco en el cual se ha centrado la elaboración del modelo, al ser las referencias que permiten el dimensionamiento del impacto que esta comunidad tendría en el sector eléctrico de la zona objeto de estudio, quedando esto último ya fuera de alcance de este trabajo. En última instancia, con los resultados de consumo total por usuario se elabora un presupuesto de movilidad con VE con y sin discriminación horaria en la tarifa eléctrica, al considerarse este un aspecto interesante desde el punto de vista del usuario de cara a valorar acogerse o no a esta nueva forma de movilidad.

4.2.1 PERFIL DE MOVILIDAD SIMULADO

Acorde a los datos de entrada introducidos, especificados en el apartado 4.1, el programa crea en cada iteración una comunidad ficticia de igual número de usuarios al introducido en la variable de iniciación, pero en una proporción variable de aquellos de tipo privado personal y privado profesional. Así mismo será diferente el número medio de desplazamiento que se le asocia a cada conjunto, pero siempre respetando un ratio de error mínimo que garantice la alta semejanza entre datos reales y datos simulados de manera tal que la simulación se ajuste en gran medida a la realidad deseada.

Para cada usuario, el programa simula un perfil de movilidad que caracteriza los hábitos y las necesidades diarias del citado agente en lo referente a su movilidad en su ámbito urbano de residencia. Este determinará en gran medida el consumo eléctrico para ese usuario y, por consiguiente, el coste de movilidad.

4.2.1.1 NÚMERO DE DESPLAZAMIENTOS MEDIO POR PERSONA Y DÍA

En la Tabla 13 aparecen reflejados los datos relativos a número medio de desplazamiento por día según tipo de usuario revertidos por la simulación. Para una comunidad con un 84.8% de sus usuarios categorizados como de tipo privado personal, aquellos que realizan un número inferior a 7 desplazamiento al día, y el restante 15.2% pertenecientes al conjunto de profesionales, el número medio de desplazamiento que realiza una persona cualquiera a lo largo de un mismo día queda cifrado en 4.46. Si se tiene en cuenta el conjunto al que pertenece la persona en cuestión, se puede afirmar que este ratio de desplazamiento por persona y día es

aproximadamente el doble para el conjunto de los profesionales que para los privados personales, al igual que ocurre en la comunidad real. Más adelante se incluye una comparativa más detallada entre realidad y simulación.

TIPO DE USUARIO	CARACTERÍSTICA PARA CLASIFICACIÓN	% DE PARTICIPACIÓN	RATIO DESP/PERS,DÍA
Privado Personal	< 7 despl/día	84.8%	3.81
Privado Profesional	>= 7 despl/día	15.2%	7.92
NÚMERO MEDIA DE DESPLAZAMIENTO POR USUARIO			4.46

Tabla 13. Número medio de desplazamiento por usuario y día para la comunidad simulada. Resultado de simulación.

4.2.1.2 DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LOS DESPLAZAMIENTOS

En la Imagen 25 aparecen representadas las gráficas de distribución horaria de los desplazamientos realizados en la comunidad simulada, acorde a los perfiles de movilidad que el programa ha asignado a cada usuario participante. Es clara la marcada tendencia temporal para todos los conjuntos de usuarios representados. Así pues, se puede observar como la mayoría de los desplazamientos realizados por usuarios de tipo privado profesional se concentran en las primeras horas y las horas centrales de día, es decir, entre las 7:00 y las 9:00 de la mañana y entre las 13:00 y las 15:00, siendo especialmente elevado el número de estos hacia las 8:00 de la mañana. Para el caso de usuarios de tipo privado personal la tendencia es ligeramente diferente, apreciándose tres picos de concentración de desplazamientos, por la mañana entre 7:00 y las 9:00 y por la tarde entre las 14:00 y las 15:00 y entre las 17:00 y las 20:00. Es mayor el número de desplazamientos realizados por motivo ocupacional en las primeras horas de la mañana, coincidiendo con las horas de entrada a los puestos de trabajo o el inicio de las clases y por la tarde, coincidiendo con las salidas de los mismos. En cambio, aquellos asociados a un motivo personal se concentran más en las horas cercanas al mediodía y por la noche, coincidiendo con los horarios habituales de compras y los regresos a casa, como puede observarse en la gráfica de la derecha.

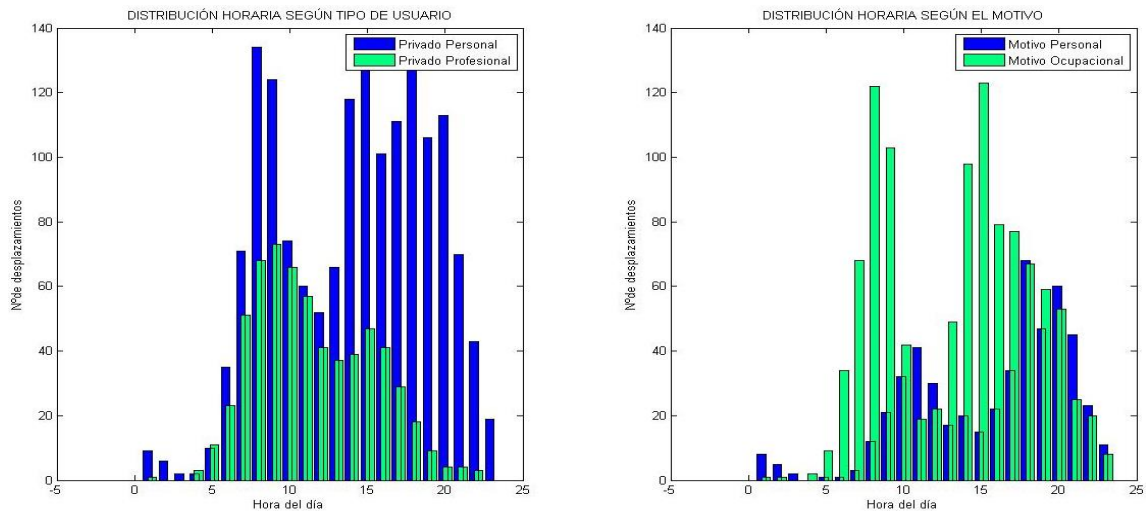


Imagen 25. Distribución horaria de los desplazamientos en función del tipo de usuario (izquierda) y del motivo del desplazamiento (derecha) para la comunidad simulada. Resultado de simulación.

Se puede apreciar claramente la elevada semejanza que guardan las franjas horarias de concentración de desplazamientos determinadas según los resultados de la simulación y las representativas de los datos estadísticos de la comunidad real, introducidos al programa. Factor indicativo de cómo las características y necesidades de movilidad propias a la comunidad simulada en el día de simulación se ajustan al patrón de hábitos de la comunidad real utilizada para alimentar del modelo. Sí es cierto que entre ambos conjuntos de gráficas se observan algunas diferencias, lo cual es lógico ya que también varían los porcentajes de usuarios de cada conjunto intervinientes en el día de movilidad analizado según la simulación, pero principalmente debido a que la gráfica con datos reales representa la totalidad de desplazamiento realizados por todos los habitantes de la ciudad seleccionada al estar así registrados en las bases de datos consultadas, mientras que en la simulación se han extrapolado tales datos al conjunto de usuarios de VE participantes en el estudio. Este aspecto así como una comparativa más amplia aparecen desarrollados en el apartado 4.2.2.

4.2.1.3 DURACIÓN, VELOCIDAD Y LONGITUD MEDIAS DE DESPLAZAMIENTO

Tras la simulación, según cada perfil de movilidad estipulado por el programa para cada usuario ese día, se elabora un recuento de longitudes totales recorridas por usuario y día. Siguiendo esto, se extrae el valor medio de longitud total de desplazamiento diario para un usuario de tipo privado personal y un usuario de tipo privado profesional en un día entre semana. Por otra parte,

acorde a la longitud total recorrida por cada usuario y el número de desplazamientos realizados por el mismo, se extrae la longitud media de desplazamiento por usuario y día para ambos tipos de usuarios considerados, independientemente del motivo por el cual el mismo fue realizado.

La longitud media de desplazamiento por usuario y día es de 9.82km para aquel de tipo privado personal, bien lo realice con objeto de ir al lugar de trabajo o estudios o con objeto ocioso, compras o visitas. Tal longitud se reduce a un valor medio de 8.64km cuando se refiere a un desplazamiento llevado a cabo por un agente profesional. En la Tabla 14 y la Tabla 15 se detallan los valores obtenidos tras el proceso de simulación del modelo elaborado.

Acorde a los valores de longitud de desplazamiento individual simulados, cada desplazamiento realizado por cada usuario, para ambos conjunto de usuarios, es clasificado como interior o exterior en base a la longitud considerada como delimitante. Una vez clasificado se le asigna la velocidad promedio que le corresponde por tipo de desplazamiento, pudiéndose con esta y la longitud sacar la duración de cada uno de los desplazamientos realizados. De manera análoga al caso de longitudes, se extraen los valores duración media de desplazamiento, que para la presente simulación quedan cifrados en 15.05 minutos para el caso de un usuario privado personal y en 13.73 minutos para uno profesional. Puede observarse que a pesar de que el perfil de movilidad para todo usuario de tipo profesional comprende un número significativamente superior de desplazamientos a lo largo del día, estos son más cortos en longitud y breves en duración que los realizados por aquellos usuarios de tipo privado personal.

USUARIO TIPO PRIVADO PERSONAL

LONGITUDES	RESULTADO SIMULACIÓN [km]
Longitud media total recorrida por usuario y día	37.80
Longitud media de cada desplazamiento por usuario y día	9.82
DURACIONES	RESULTADO SIMULACIÓN [min]
Duración media del total de desplazamientos por usuario y día	57.60
Duración media de cada desplazamiento por usuario y día	15.05

Tabla 14. Longitud y duración media total y longitud y duración media por desplazamiento para usuarios privados personales para la comunidad simulada. Resultados de simulación.

USUARIO TIPO PRIVADO PROFESIONAL

LONGITUDES	RESULTADO SIMULACIÓN [km]
Longitud media total recorrida por usuario y día	68.25
Longitud media de cada desplazamiento por usuario y día	8.64
DURACIONES	RESULTADO SIMULACIÓN [min]
Duración media del total de desplazamientos por usuario y día	108.78
Duración media de cada desplazamiento por usuario y día	13.73

Tabla 15. Longitud y duración media total y longitud y duración media por desplazamiento para usuarios privados personales para la comunidad simulada. Resultados de simulación.

Conocida la duración individual y la hora de inicio, se sabe la hora a la que cada uno de los desplazamientos finaliza. Queda así completado el perfil de movilidad de cada usuario considerado, para la totalidad del día de simulación, en los cuales se recogen las características y necesidades de movilidad de cada uno de ellos, atendiendo al tipo de usuario que sea. Como se ha dicho, este marcará en gran medida el consumo y, por tanto, la demanda eléctrica simulada para este día y esta comunidad. Se remarca nuevamente que queda garantizado con el algoritmo implementado que no se producirá solapamiento de desplazamientos para un mismo usuario ni se dará comienzo en la misma hora a dos desplazamientos de un mismo agente. Así mismo, se garantiza que ningún desplazamiento finaliza después de las 24 horas, límite horario de esta simulación.

4.2.2 COMPARATIVA RESULTADOS CON DATOS REALES

Este apartado tiene por objeto resumir la comparativa entre datos reales de la comunidad objeto de estudio y los datos aportados por el modelo tras la simulación de la situación deseada, para facilitar la comprobación de que tal modelo de simulación sigue de cerca la realidad objeto de estudio, representando fielmente las características y necesidades propias de la movilidad urbana en la misma. Nuevamente se estructura a presentación en tres bloques, dentro de lo referente a movilidad: número de desplazamientos, distribución horaria de los desplazamientos a lo largo del día y, por último, duraciones, velocidades y longitudes de los mismos.

4.2.2.1 NÚMERO DE DESPLAZAMIENTOS MEDIO POR PERSONA Y DÍA

La Tabla 16 recoge los valores reales y simulados referentes al conjunto de usuarios de tipo privado personal, sin hacer distinción entre motivo por el cual el usuario realiza cada desplazamiento, sobre grado de penetración de usuarios de este tipo en el cómputo global de la comunidad de VE y número medio de desplazamientos al día por usuario.

USUARIO TIPO PRIVADO PERSONAL

	VALORES REALES	VALORES SIMULACIÓN
Porcentaje de participación de este conjunto de usuarios	90%	84.8%
Ratio desplazamiento/persona y día	3.31	3.81

Tabla 16. Número de desplazamiento por usuario y día y porcentaje de participación para usuarios privados personales. Comparativa de datos reales y resultados de simulación.

De manera similar, la Tabla 17 recoge tales valores pero específicos para el conjunto de los agentes de carácter profesional.

USUARIO TIPO PRIVADO PROFESIONAL

	VALORES REALES	VALORES SIMULACIÓN
Porcentaje de participación de este conjunto de usuarios	10%	15.2%
Ratio desplazamiento/persona y día	8.50	7.91

Tabla 17. Número de desplazamiento por usuario y día y porcentaje de participación para usuarios privados profesionales. Comparativa de datos reales y resultados de simulación.

Puede apreciarse la existencia de una desviación de tan solo un 5.2% en el grado de participación asociado cada conjunto de usuarios en la totalidad de la comunidad, siendo la diferencia en el número medio de desplazamientos del entorno a medio desplazamiento al día por usuario. Para el grupo de usuarios profesionales, la comparativa se realiza con el ratio de desplazamientos por persona y día asociados al conjunto de agentes considerados dentro de profesionales en este trabajo en concreto, no así con el de todos los profesionales que engloban los datos de movilidad urbana de la base de datos, como se explicó en el apartado 4.1. En vistas a esto puede afirmarse pues la correcta adecuación de la simulación a la realidad impuesta.

4.2.2.2 DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LOS DESPLAZAMIENTOS

Para la comparativa entre distribución de desplazamientos real y la simulada, bien en función del tipo de usuario que realiza el mismo, bien por el motivo que lleva a su realización, se aporta en la Imagen 26 las gráficas que representan dichas distribuciones, respectivamente.

Cabe puntualizar que el aspecto relevante a comparar para el estudio aquí desarrollado no es el número de desplazamientos sino los hábitos y comportamientos de movilidad presentados por los agentes intervinientes. El número de desplazamientos reflejados en la gráfica de datos reales engloba el total de habitantes de la comunidad de la cual se han extraído los datos, mientras que los de la gráfica de resultados son solo para los usuarios de VE de la comunidad objeto de estudio. Lo que se hace es una interpolación de datos una a otra de manera que se extraiga la tendencia de producirse desplazamientos a lo largo de las diferentes horas del día, pudiéndose comprobar que en el punto importante objeto de análisis, los hábitos o necesidades de movilidad de los usuarios participantes, sí se ajustan simulación a realidad. Siendo este pues el factor indicativo de cuan realista es el modelo y de cuanto se asemeja a la realidad que se quiere estudiar, nuevamente. Esto es asumido así debido a la coincidencia de franjas horarias de concentración de picos y valles de desplazamiento a lo largo del día, en función del tipo de agente y de la motivación del desplazamiento.

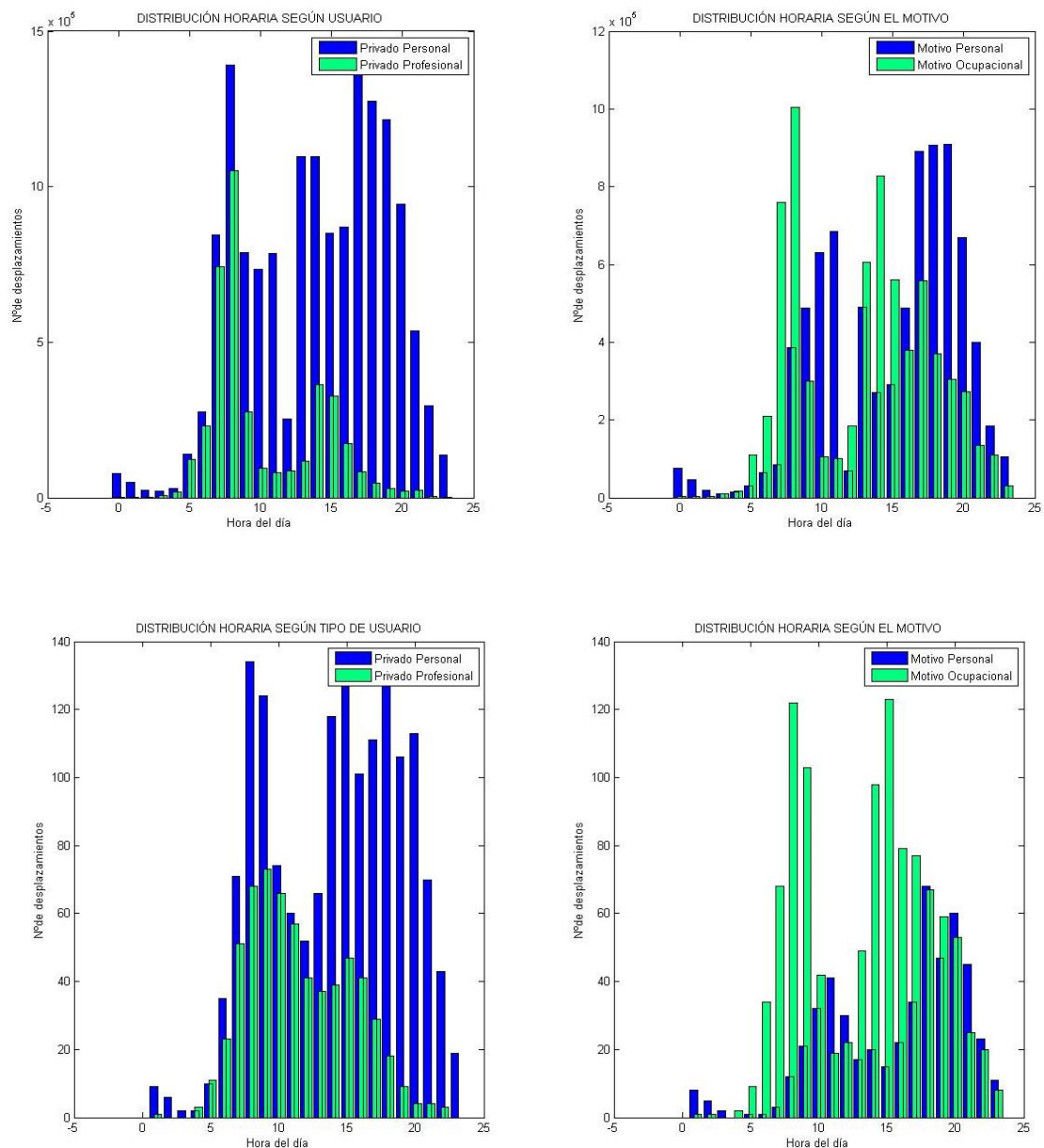


Imagen 26. Distribución horaria de desplazamientos en función del tipo de usuario (izquierda) y del motivo del desplazamiento (derecha). Comparativa datos reales y resultados de simulación.

4.2.2.3 DURACIÓN, VELOCIDAD Y LONGITUD MEDIAS DE DESPLAZAMIENTO

Este apartado es probablemente el que pueda asumir un mayor índice de variación entre valores reales y resultados de simulación, debido a la infinidad de posibilidades de desplazamientos que pueden darse a lo largo del día y que caracterizan la longitud y duración de los mismos. En la Tabla 18 se aportan los valores medio de longitud y duración asociados a un desplazamiento

individual de un agente tipo privado personal en un día entre diario. Por su parte, los mismo asociados a un agente de carácter profesional se reflejan en la Tabla 19.

USUARIO TIPO PRIVADO PERSONAL

LONGITUDES	VALORES REALES [km]	VALORES SIMULACIÓN [km]
Longitud media de cada desplazamiento por usuario y día	9.94	9.82
DURACIONES	VALORES REALES [min]	VALORES SIMULACIÓN [min]
Duración media de cada desplazamiento por usuario y día	17.26	15.05

Tabla 18. Longitud y duración media por desplazamiento para usuarios privados personales. Comparativa datos reales y resultados de simulación.

USUARIO TIPO PRIVADO PROFESIONAL

LONGITUDES	VALORES REALES [km]	VALORES SIMULACIÓN [km]
Longitud media de cada desplazamiento por usuario y día	8.58	8.64
DURACIONES	VALORES REALES [min]	VALORES SIMULACIÓN [min]
Duración media de cada desplazamiento por usuario y día	16.27	13.73

Tabla 19. Longitud y duración media por desplazamiento para usuarios privados profesionales. Comparativa datos reales y resultados de simulación.

En general puede concluirse la existencia de un ratio de error prácticamente inexistente entre valores de longitudes medias reales y simuladas, siendo ligeramente superior en cuanto a los de duraciones. Es cierto que aun así el citado error sigue siendo del todo pequeño al venir las duraciones expresadas en la tabla en minutos, en lugar de horas que es en lo cual lo calcula el programa. Se habla de un error de unos 2-3 minutos en ambos caso. Se ha optado por expresar las duraciones en minutos en los análisis desarrollados en la presente memoria, al haberse considerado una unidad más manejable y adecuada para la representación de las magnitudes que aquí se están tratando, a pesar de que el programa realiza los cálculos en unidades del Sistema Internacional (SI).

4.2.2.4 CONCLUSIÓN DE LA COMPARATIVA

Se puede concluir tras este análisis comparativo aportado que el modelo simulado responde de manera altamente realista, ajustando sus valores simulados en un grado muy elevado a la realidad impuesta con los datos de entrada introducidos. En vistas a esto, se puede proceder a analizar las variables cuyos valores resultado son objeto de este trabajo ya que queda garantizado el buen funcionamiento del modelo y que estos resultados se ajustaran bastante a la realidad estudiada.

4.2.3 DEMANDA ELÉCTRICA ASOCIADA A LA COMUNIDAD SIMULADA Y CONSUMO ESTIMADO

Las curvas de demanda y los consumos eléctricos no solo dependen de los datos de movilidad, de modelos de VE y de cargas hasta aquí detallados en este capítulo, sino que en ellos tienen una fuerte influencia las estrategias de carga adoptadas. Son claramente apreciables las diferencias entre curvas de demanda asociadas a estrategias de carga diferentes, pudiéndose tomar conciencia de la importancia de llevar a cabo una carga inteligente o controlada para la factible integración del VE en las ciudades, como alternativa de movilidad.

En la Imagen 27 aparece representada la curva de demanda eléctrica asociada a la comunidad de VE aquí simulada, según conjunto de usuarios. Es clara la diferencia existente entre dicha curva para el conjunto de usuarios de carácter privado personal y la misma para los de carácter privado profesional. Este último conjunto de usuarios presenta la demanda, en verde en la gráfica, muy repartida a lo largo de un amplio intervalo de horas que va desde las 8:00 hasta las 17:00-18:00 horas, lo cual coincide de lleno con la totalidad de una jornada laboral normal. Se puede decir que el patrón de consumo de este conjunto de agentes es ciertamente homogéneo durante el citado intervalo temporal, con tan solo dos picos de demanda en dos horas del entorno de aquellas que presentan la mayor concentración de desplazamientos según distribución horaria estudiada anteriormente, en el apartado 4.1.1, y que pueden coincidir con las horas en las cuales finaliza un mayor número de desplazamientos de este tipo de usuarios. Se puede concluir pues, que el patrón de carga seguido por los usuarios profesionales, y representado por la gráfica aportada por el programa, se ajusta adecuadamente a las características de movilidad específicas de este conjunto. Estas características vienen determinadas por la necesidad de realización de un número elevado de desplazamiento,

generalmente cortos, repartidos a lo largo de toda una jornada laboral y con paradas también breves entre unos y otros.

Por el contrario, la demanda asociada a usuarios de tipo privado personal, representada en azul en la gráfica, no sigue ninguna tendencia clara ni homogénea. Se caracteriza por presentar picos y valles a lo largo de todo el día. Como se ha mencionada, esta curva está muy relacionada con la estrategia de carga asumida en la simulación. Es característico de ella el pico de demanda presentado en las horas finales del día, sobre las 22:00 horas, al incentivarse en mayor medida la recarga doméstica nocturna. Es decir, se asume que los usuarios de tipo privado personal optan por retrasar la citada carga al inicio de las horas en las cuales la energía consumida lleva asociado un menor coste, según tarifa con discriminación horaria. Nuevamente pues, queda patente la correcta representación de la estrategia aplicada en el algoritmo, prueba del correcto funcionamiento del programa. Así mismo, si se analizan los intervalos de horas en los cuales se presentan los picos de demanda, queda patente el realismo de la simulación al coincidir de lleno estos con los picos de concentración de desplazamientos, que a su vez coinciden con la horas de entrada y salida de los puestos de trabajo o estudios (8:00-9:00 horas y 17:00-18:00 horas) así como aquellas en las cuales típicamente se realizan las compras cotidianas o son dedicadas al tiempo de ocio, visitas o horario de comida (14:00-16:00 horas y 18:00-19:00 horas).

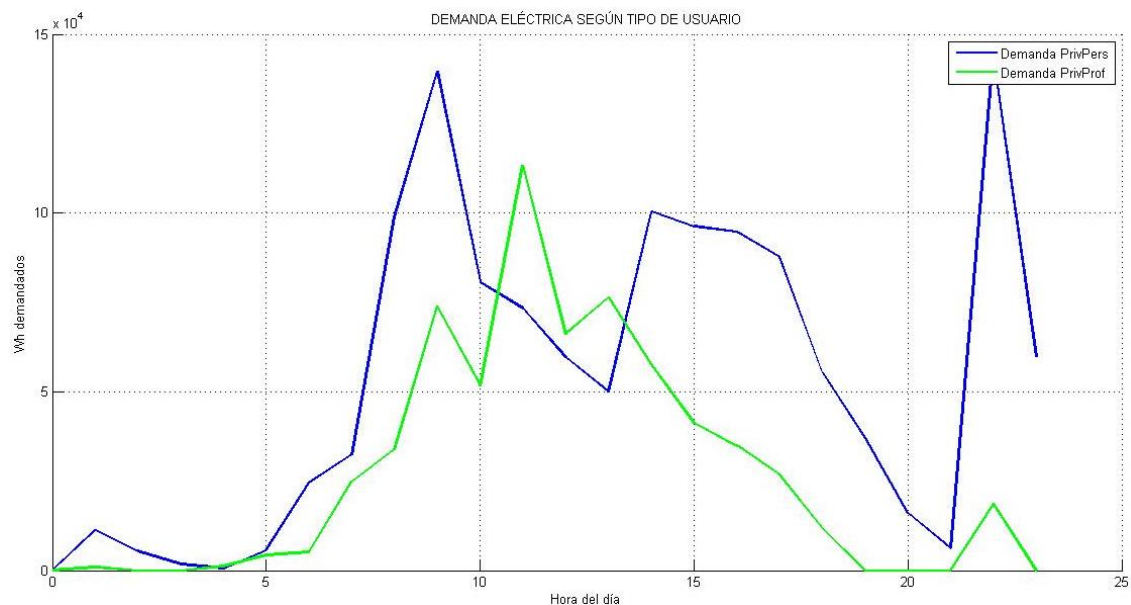


Imagen 27. Curva de demanda horaria en función del tipo de usuarios para la comunidad simulada. Resultado de simulación.

Se concluye así que, en general, las diferencias presentadas por una y otra curva de demanda eléctrica guardan una profunda relación con las necesidades y características de movilidad más significativas de cada conjunto de agentes. Los VE utilizados con fines profesionales realizan un mayor número de desplazamientos a lo largo del día, pero de mayor brevedad que aquellos dedicados a transportes del ámbito personal, bien con motivo ocupacional bien con motivo puramente ocioso. Este hace que las cargas intermedias sean mucho más numerosas y constantes, aunque de menor consumo eléctrico en el primer conjunto de VEs. La mayor brevedad de las paradas, potenciado por el mayor número de desplazamientos, explica el hecho de que el conjunto de usuarios de tipo profesional pueda verse obligado a realizar alguna carga en modo rápido a lo largo del día, como refleja la gráfica de la Imagen 28. Para las decisiones o requisitos de elección de carga aquí considerados, las cargas en modo rápido por parte de usuarios de tipo privado personal son del todo infrecuentes, por lo que en el cómputo global de los resultados de simulación de este proyecto no se ven reflejadas.

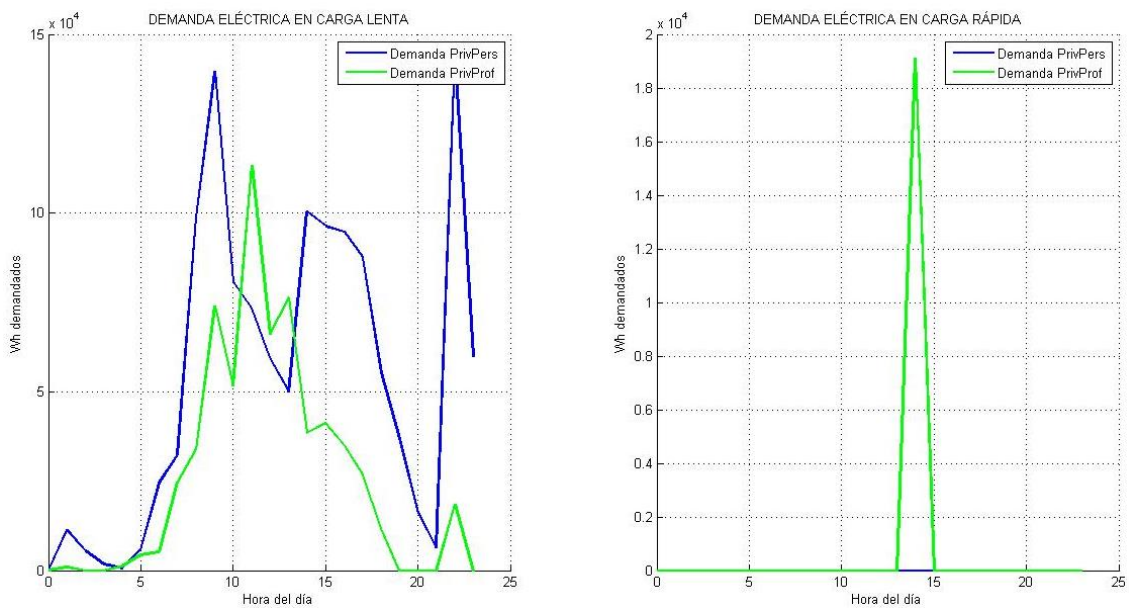


Imagen 28. Curva de demanda horaria en función del tipo de usuario (izquierda) y del motivo del desplazamiento (derecha) para la comunidad simulada. Resultados de simulación.

Cabe destacar nuevamente la prioridad que el programa otorga al modo de carga lenta, al ser el de menor impacto para la red y además preverse como el más económico para el usuario, y que todas las hipótesis y estimaciones tomadas por buenas en este modelo son dimensionadas para el caso más conservador que pueda darse en la comunidad objeto de estudio, en función de las

características propias de esta, de las necesidades de movilidad de sus usuarios y de los modelos de vehículo interviniente.

Los resultados reflejados en estas curvas han sido obtenidos para la comunidad detallada a lo largo de este capítulo siguiendo la estrategia de carga expuesta en el capítulo anterior, en el apartado 3.4.1. Así pues, una vez dimensionada la comunidad y determinado el número de iteraciones necesario, se da comienzo a la simulación de la cual, con objeto de alcanzar estas gráficas y los valores de consumo, se toma registro en cada iteración de la potencia real demandada a la red y la hora y el modo en que dicha demanda fue realizada para cada desplazamiento y cada usuario. Los resultados aquí mostrados son los valores promedio para la totalidad de desplazamientos realizados por cada agente, para el cómputo global de agentes participantes en el estudio. A continuación, en la Imagen 29 se puede apreciar la curva de demanda global asociada a la comunidad estudiada, para todos los usuarios interviniente, independientemente del conjunto al que pertenezcan y para todas las cargas efectuadas, independientemente del modo en el cual fueron efectuadas.

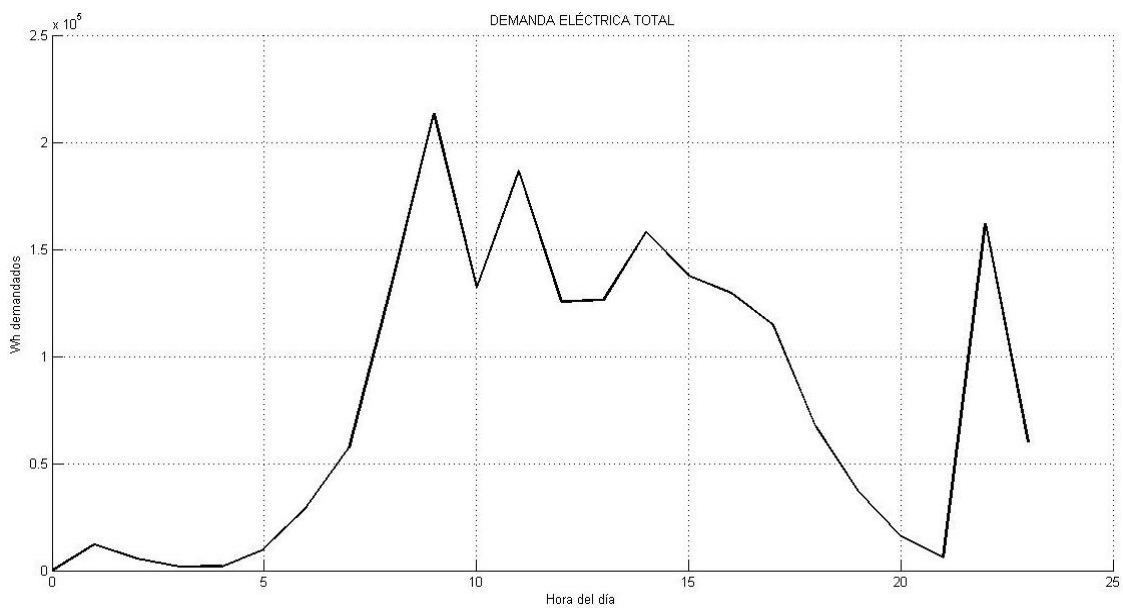


Imagen 29. Curva de demanda horaria para el conjunto total de usuarios participantes en la comunidad simulada. Resultados de simulación.

Tras este análisis gráfico del consumo asociado a esta comunidad de VE, a continuación se adjunta la Tabla 20 que cuantifica el mismo en kWh, aportando los datos de consumos totales para cada comunidad según modo de carga así como la potencia total que le será demandada a

la red de distribución a la cual se asocie esta comunidad. Son todos ellos valores de potencia real aportada por el puesto de recarga en cuestión, no potencia útil que llega a la batería del VE, al ser la que ha de aportar la red y por la cual el usuario va a pagar.

CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

CONSUMOS MEDIOS SEGÚN TIPO DE USUARIO	RESULTADO SIMULACIÓN [kWh]
Consumo medio de un usuario privado personal	5.96
Consumo medio de un usuario privado personal	11.80
CONSUMOS TOTALES SEGÚN MODO DE CARGA	RESULTADO SIMULACIÓN [kWh]
Consumo total en Carga Lenta	3372.3
Consumo total en Carga Rápida	19.102
Consumo Total	3391.4

Tabla 20. Consumo eléctrico medio por usuario en función del tipo de usuario y consumo eléctrico total según el modo de carga para la comunidad simulada. Resultados de simulación.

Con todo, puede afirmarse que el consumo medio estimado por usuario es de unos 6kWh para aquellos considerados de tipo privado personal, ascendiendo hasta algo más de los 11kWh para los profesionales de la movilidad. En función del modo de carga y para una estrategia de carga como la detallada en los apartados 3.4.1 y 3.4.2, el consumo energético total se estima en 3403kWh/día para la carga lenta y en tan solo 19.8kWh/día para el modo rápido. Así con todo, el consumo de electricidad asociado a la comunidad simulada, según el modelo aquí detallado, se estima en 3.4MWh para un día completo de simulación y para todo el conjunto global de 500 VEs, independientemente del tipo de usuario que lo conduzca y del modo en que se efectúe las solicitudes a red.

4.2.4 COSTE ASOCIADO A MOVILIDAD CON VEHÍCULO ELÉCTRICO

Más a modo de curiosidad, y valorando el interés que desde el punto de vista del usuario de a pie despierta conocer cuánto le puede costar decantarse por un VE en términos de movilidad urbana diaria, en la presente memoria se ha decidido incluir un breve presupuesto referente a este tema. En la Tabla 21 aparece detallado el coste medio total diario de desplazarse con un VE en un ámbito urbano, en función del tipo de usuarios y de la tarifa eléctrica que aplique. Se puede ver que verdaderamente existe diferencia monetaria al acogerse a una tarifa sin

discriminación horario o a una con discriminación, quedando nuevamente claro la importancia de la estrategia de carga seguida por los usuarios para la eficiencia de esta nueva movilidad.

PRESUPUESTO DE MOVILIDAD CON VEHÍCULO ELÉCTRICO

COSTE APLICANDO TARIFA SIN DISCRIMINACIÓN HORARIA	PRECIO SIN IVA [€/DÍA]	PRECIO CON IVA [€/DÍA]	PRECIO SIN IVA [€/km](*)	PRECIO CON IVA [€/km]
Coste medio por usuario para usuarios de tipo privado personal	0.903	1.092	0.024	0.029
Coste medio por usuario para usuarios de tipo privado profesional	1.678	2.030	0.024	0.029
COSTE APLICANDO TARIFA CON DISCRIMINACIÓN HORARIA	PRECIO SIN IVA [€/DÍA]	PRECIO CON IVA [€/DÍA]	PRECIO SIN IVA [€/km]	PRECIO CON IVA [€/km]
Coste medio por usuario para usuarios de tipo privado personal	0.549	0.664	0.015	0.018
Coste medio por usuario para usuarios de tipo privado profesional	1.180	1.428	0.015	0.018

Tabla 21. Presupuesto medio de movilidad con tecnología de VE para un usuario por día o por kilómetro recorrido, con y sin IVA, para la comunidad simulada. Resultado de simulación. (*)Calculado usando el valor de longitud media total para un día de movilidad según tipo de usuario para la comunidad simulada, indicado en Tabla 14 y Tabla 15.

Para clarificar cuán barata resulta la movilidad con VE, se puede tomar como referencia el coste por kilómetro recorrido asociado a un VCI gasolina y a otro diésel, reflejados en la Tabla 22.

COSTE ASOCIADO A LA MOVILIDAD CON VCI

	VCI GASOLINA [€/km]	VCI DIESEL [€/km]
Coste por km recorrido con un VCI, IVA incluido	0.080	0.072

Tabla 22. Presupuesto de movilidad con tecnología de VCI por km recorrido con un gasolina y con un diésel, IVA incluido. Para un precio de la gasolina de 1.35€/l y del diésel de 1.20€/l y un consumo del VCI de 6l/100km.

Se puede comprobar que el coste por kilómetro recorrido con tecnología de VE se cuantifica en menos de la mitad que el mismo con VCI gasolina o diésel, considerándose así suficientemente demostrado el reducido coste que la movilidad en VE lleva asociada y el cual puede reducirse aún más aplicando estrategias de carga que lleven a cargar mayoritariamente el VE en horas valle de demanda eléctrica convencional, mientras se acojan los usuarios a tarifas con discriminación horaria. Se prevé que el tema de las tarifas de aquí en adelante marque aún más significativamente el precio diario de movilidad con VE, al ser usadas estas como medio por

parte de las compañías eléctricas para incentivar cargas en horas de reducida demanda eléctrica convencional, lo cual les permite aplanar la curva de demanda facilitándose la operabilidad del sistema eléctrico en su conjunto. Conviene aclarar que los costes aportados en este apartado se reducen al coste propio del combustible, no teniéndose en cuenta la parte proporcional referente a la amortización del vehículo, los gastos fijos (seguro, impuestos, ITV, lavado, etc.) ni el mantenimiento del mismo.

4.3 COMPARATIVA DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE CARGA

Con objeto de comprobar la importancia que los hábitos de carga tienen en la integración del VE en las ciudades actuales, se ha decidido finalizar el presente trabajo realizando una comparativa de diferentes estrategias de carga para un mismo modelo de simulación, manteniendo constantes los datos de entrada que caracterizan la comunidad simulada, y analizando sus curvas de demanda y sus consumos. Tras diferentes pruebas y el análisis de los resultados asociados a las mismas, se ha optado por implementar los tres casos expuestos a continuación y que podrían resumirse como: carga controlada estándar, carga sin control y carga controlada limitada.

Conviene aclarar antes que los resultados mostrados hasta ahora a lo largo del presente capítulo han sido obtenidos para el caso de carga controlada estándar, en el cual dicho control está orientado a incentivar las cargas lentas domésticas, y que la citada comparativa entre modelos se lleva a cabo a través del análisis de las curvas de demanda y los consumos obtenidos tras la implementación de todos ellos, a igualdad del resto de parámetros que dimensionan la comunidad y que establecen los perfiles de movilidad de los usuarios. Es cierto que estos valores sufrirán ciertas variaciones, ya que corresponden a simulaciones diferentes, pero el ratio de error asumido que esto introduce en el análisis objetivo se ha mantenido totalmente inapreciable.

4.3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRATEGÍAS CONSIDERADAS

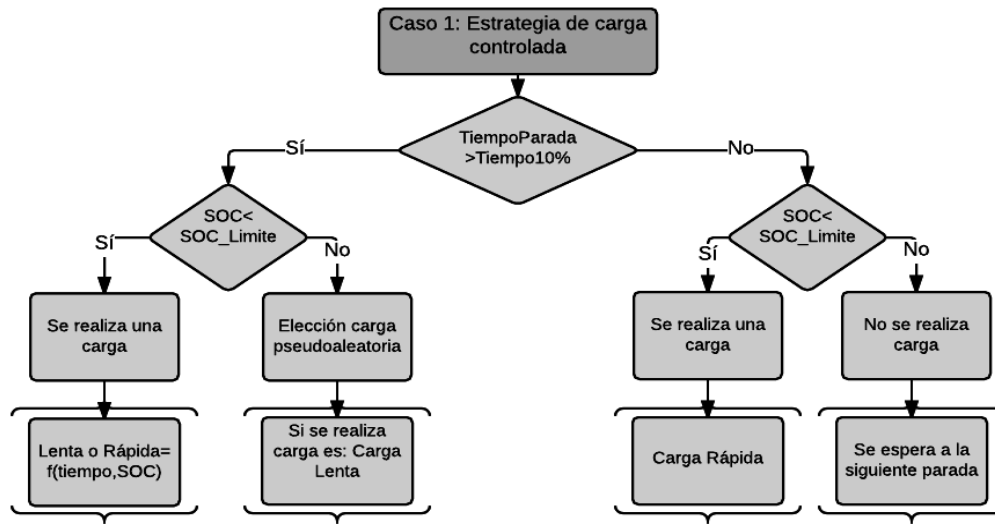
4.3.1.1 CASO 1: CARGA CONTROLADA ESTÁNDAR

La estrategia de carga característica de este primer caso es la explicada en los apartados 3.4.1 y 3.4.2 y esquematizada en la Imagen 30. Como se sabe, en ella se contempla la posibilidad de ocurrencia de cuatro situaciones diferentes en función del tiempo disponible para la carga y del nivel de batería disponible al realizar su parada. Así pues, cuando el tiempo de parada otorga la posibilidad de adquirir al menos un 10% de batería en modo de carga lenta y el nivel de la batería al parar no es el suficiente como para que se pueda cubrir un desplazamiento de longitud media, dimensionado de manera particular para la comunidad simulada, entonces se asume que el usuario de VE realiza una carga. Siguiendo las asunciones de dar prioridad a la carga lenta y de dimensionar las circunstancias para el caso más conservador, la elección de modo de carga se lleva a cabo en función de si mediante lento se alcanza o no la potencia que asegure al usuario cubrir el peor de los desplazamientos que podrían darse para la comunidad simulada, aquel de mayor longitud realizado con el VE de mayor consumo. En el caso de que, al parar, la batería cuente con un nivel suficiente que permita afrontar un desplazamiento medio y el tiempo de parada siga siendo suficiente para llegar a alcanzar al menos un 10% de batería, se abre la posibilidad de que el usuario decida cargar o decida esperar a la siguiente parada, generándose dicha elección de manera pseudoaleatoria con mayor probabilidad de la elección de no cargar, aproximadamente un 67% para suceso “no carga” y un 33% para suceso “carga”. Para el caso opuesto, aquel en el que el tiempo de parada no es suficiente para alcanzar ni siquiera un 10% de batería, sólo se contempla elección de carga si la potencia disponible en la batería no alcanza para superar un trayecto de longitud media, contemplándose en este caso únicamente la carga rápida. En caso de poder solventar tal desplazamiento, el programa no plantea la opción de cargar al carecer de sentido debilitar la vida de la batería para obtener un nivel de carga inferior al citado 10%, el cual permite apenas un desplazamiento corto¹⁷.

La curva de demanda característica de una comunidad como la simulada al seguir sus usuarios la estrategia de carga aquí detallada puede verse en la Imagen 33, la Imagen 36 y la Imagen 39, donde es claramente apreciable el predominio de la carga doméstica en las horas finales del día,

¹⁷ Un 10% de capacidad de batería se cifra en unos 2.25 kWh, para la capacidad de batería media de todos los modelos incluido en el catálogo de VE considerado en el presente estudio. Esa potencia permite un desplazamiento de 3.66 minutos, lo cual resulta del todo insignificante para el caso tratado.

para aquellos usuarios de carácter privado personal. Tras la exposición de los casos considerados se aporta una valoración más detallada de las curvas de demanda.



Tiempo10%: tiempo necesario para carga al menos el 10% de la batería, en función de su capacidad (diferente para cada modelo de VE).

SOC: Estado de la batería tras a realización de una carga lenta durante el tiempo de parada.

SOC Limite: Nivel de batería necesario para cubrir un desplazamiento de longitud media, específico para la comunidad estudiada.

Imagen 30. Estrategia de carga con control, caso 1. Esquema de actuación.

4.3.1.2 CASO 2: CARGA SIN CONTROL

Confiando y apoyando la futura implementación de los sistemas V2G y el triunfo de conceptos como Smart Grid, el modelo elaborado en el presente proyecto en general asume la existencia de comunicación continua entre vehículo y red, lo cual abarca el hecho de que cada vez que se produzca el estacionamiento de un VE éste quedará automáticamente conectado a la red. En vistas a esta asunción, este caso particular de estrategia de carga estudia la posibilidad de que todo usuario de VE perteneciente a la comunidad objeto de estudio, aprovechándose de este hecho, siga unos hábitos de carga sin control específico de manera tal que realice solicitudes a la red en cada estacionamiento. Tales solicitudes quedarán dimensionadas en función de tiempo y del modo de carga seleccionado. La elección de este último se toma en función de tiempo de estacionamiento o tiempo entre desplazamos, de manera tal que si durante el citado tiempo disponible la batería logra alcanzar en carga lenta una potencia tal que le asegure completar un desplazamiento de requisito máximo, se opta por este modo. En caso contrario, el usuario recurre a una carga en modo rápido por una potencia acorde al tiempo disponible. Para ello en primer lugar se estima la potencia disponible en la batería tras una carga lenta por

el citado tiempo de parada, valor que servirá de referencia para decantarse por uno u otro modo de carga.

Las conductas de carga seguidas por los usuarios en este caso de estudio contemplan pues las siguientes dos situaciones:

- 1) Potencia disponible tras Carga Lenta > Consumo Desplazamiento Máximo. Llevando a cabo una carga en modo lento por el tiempo de parada, el nivel de batería disponible en el VE tras la misma sería suficiente como para poder solventar la situación de desplazamiento más conservadora para el caso de estudio. Siguiendo la decisión de cargar cada vez que se estaciona el VE y asumiendo que la carga lenta es suficiente para solventar la peor de las circunstancias de movilidad posibles, el modo de carga seleccionada es carga lenta.
- 2) Potencia disponible tras Carga Lenta \leq Consumo Desplazamiento Máximo. El usuario dispondría en su batería, tras una supuesta carga lenta, de una potencia que no asegura la realización completa del desplazamiento más exigente que podría darse en la comunidad simulada. Llegado este caso, la carga por la que se opta en la parada es en modo rápido.

Las curvas de demanda para cada conjunto de usuarios considerado asociadas a este caso de estudio aparecen en la Imagen 34, la Imagen 37 y la Imagen 40, donde se aprecia el mayor repartimiento del número de cargas a lo largo del día y una mayor semejanza de la citada gráfica con la de representación de la distribución horaria de los desplazamientos para la comunidad estudiada, no observándose preferencia especial por carga lenta doméstica a pesar de que el algoritmo de implementación de la citada estrategia sí tiene en el retraso de la última carga a horas de coste energético reducido.



SOC: Estado de la batería tras a realización de una carga lenta durante el tiempo de parada.
SOC Máx: Nivel de batería necesario para cubrir el desplazamiento más severo (el de mayor longitud con realizado VE de mayor consumo)

Imagen 31. Estrategia de carga sin control, caso 2. Esquema de actuación.

4.3.1.3 CASO 3: CARGA CONTROLADA Y LIMITADA

En este tercer caso se estudia la posibilidad de que el usuario siga unas conductas controladas a la hora de tomar las decisiones referentes a si realiza o no una carga cada vez que estaciona su VE. En este caso, a diferencia de lo considerado en el primero, los requisitos que el modelo impone para la decisión de si carga o no son más severos, haciendo que el número de cargas lentas en parada normal llevadas a cabo por los usuarios sea menor. Esto deriva en más situaciones catalogadas como de emergencia o de criticidad de autonomía y, por tanto, en la realización de un mayor número de cargas rápidas por la necesidad alcanzada, como puede apreciarse en las curvas de demanda de la Imagen 35, la Imagen 38 y la Imagen 41.

Al igual que en el caso 1, la decisión de carga o no carga se toma en función del tiempo disponible para la misma, comparándolo con el necesario para alcanzar un 10% de la capacidad de la batería en carga lenta, y el estado de la propia batería al estacionar el VE, siendo este nivel de batería comparado, en este caso, con el que requiere un desplazamiento de longitud máxima para la comunidad objeto de estudio. Se vuelven a dar las mismas cuatro posibilidades que en el primer tipo de estrategia de carga estudiado, pero en este caso no se da la opción de realizar una carga en modo lento cuando, aun disponiendo de un tiempo de carga aceptable, la capacidad disponible en la batería sea superior a la establecida como límite para que quede asegurado poder completar el citado desplazamiento máximo. Se ha decidido optar por comparar el nivel de batería con el necesario para aquel caso más conservador en esta estrategia de carga ya que, debido a la contemplación de un menor número de posibilidades de carga, puede existir peligro

de falta de autonomía. Este se eliminar aumentando el nivel de batería considerado como mínimo indispensable.

Así pues, solo se contempla carga lenta o rápida cuando el tiempo es aceptable y el nivel de batería bajo y carga rápida cuando tanto el tiempo disponible como la potencia están muy limitados. En el resto de circunstancias no se realizara carga. Esta estrategia de carga contempla, por tanto, las siguientes situaciones:

- 1) $Tiempo\ Parada > Tiempo_{10\%}$ y $SOC_{FinDesp} \leq SOC_{Max}$. Al ser el tiempo de parada disponible aceptable y el nivel de batería un tanto bajo, el usuario realiza una carga. El modo de carga de esta vendrá determinado según la potencia que recibiría la batería del VE a través de un puesto de carga lenta durante el tiempo de parada del que dispone. Si dicho valor es suficiente para cubrir el caso más exigente para esa comunidad y ese tipo de usuario más un extra de seguridad, se selecciona el modo de carga lenta. En caso contrario, se selecciona el modo de carga rápida.
- 2) $Tiempo\ Parada > Tiempo_{10\%}$ y $SOC_{FinDesp} > SOC_{Max}$. El usuario dispone de tiempo aceptable para plantearse la carga y un nivel de batería también aceptable, con lo que no se realiza carga alguna en esa parada, al no ser necesaria. Así pues, y a diferencia de lo ocurrido en el caso 1, no se contempla el desarrollo de una ansiedad por la autonomía por parte del usuario.
- 3) $Tiempo\ Parada < Tiempo_{10\%}$ y $SOC_{FinDesp} \leq SOC_{Max}$. El usuario dispone de un tiempo muy limitado para la carga y de un nivel de batería también muy limitado como para asegurar autonomía. Se presenta una situación de urgencia o crítica, por lo que se selecciona la realización de una carga en modo rápido. Este tipo de carga asegura la obtención del 80% de la capacidad de la batería en tan solo 20 minutos de carga.
- 4) $Tiempo\ Parada < Tiempo_{10\%}$ y $SOC_{FinDesp} > SOC_{Max}$. El usuario dispone de tiempo muy limitado para la carga y un nivel de batería aceptable para asegurar la autonomía. Dada esta situación, se asume que el usuario no realizará carga durante la parada.

A continuación se adjunta un esquema aclaratorio de esta estrategia de carga. Imagen 32.

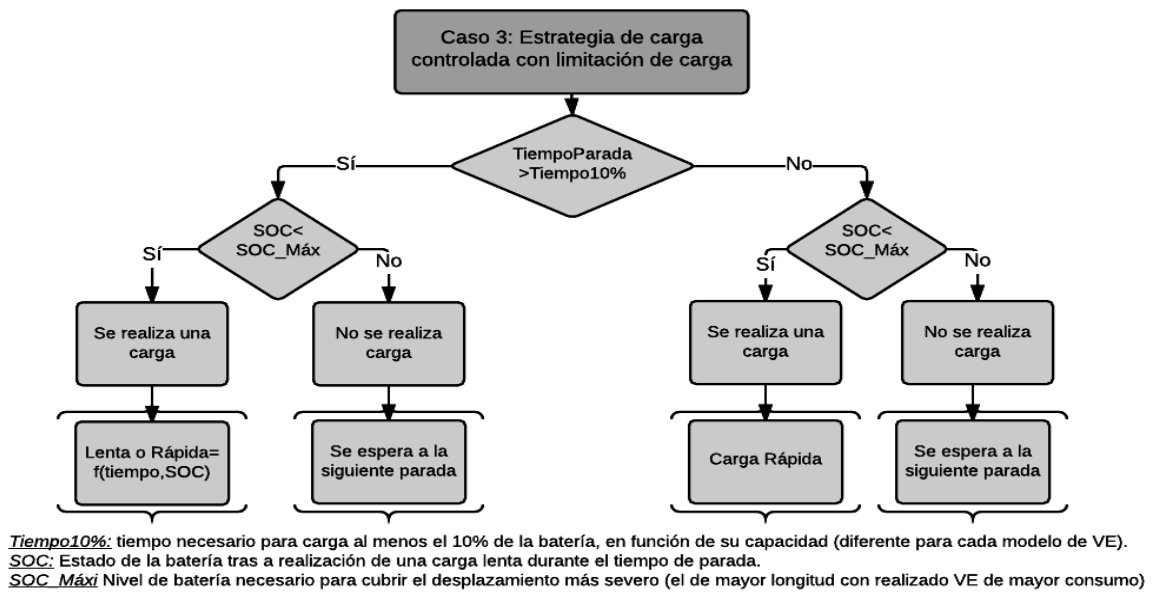


Imagen 32. Estrategia de carga con control y limitación de carga, caso 3. Esquema de actuación.

En consumo de energía eléctrica y la curva de demanda prevista para esta estrategia aparece reflejados en las gráficas de la Imagen 35, la Imagen 38 y la Imagen 41, donde se puede apreciar no solo un mayor número de cargas rápidas realizadas sino un incremento en el consumo total. Así pues, es previsible que el impacto de este caso de estudio en la red de distribución sea más severo que el del resto de los aquí estudiados.

4.3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CURVAS DE DEMANDA EN FUNCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CARGA SEGUIDA

Como ya se ha mencionado, el consumo eléctrico asociado a una comunidad de VEs y en mayor medida la forma característica de la curva de demanda vinculada a la misma, se ve profundamente influenciada por las estrategias de carga seguidas por los usuarios intervinientes, como puede apreciarse analizando las gráficas adjuntadas a continuación.

Las diferencias más significativas se observan en las curvas para usuarios de tipo privado personal, pudiéndose ver como toda carga controlada, bien caso 1 bien caso 3, otorga por norma general un mayor protagonismo a la carga lenta doméstica. Esta decantación hacia cargas lentas en horario nocturno es mayor si cabe para el último caso de estudio, el considerado como de carga limitada, ya que en el caso 1 se recurre con mayor frecuencia a cargas lentas a lo largo del día, haciendo menos necesaria la carga al llegar al estacionamiento habitual. Un punto este

bastante coherente si se tiene en cuenta que el tercer caso de estudio aplica una restricción de cargas en modo lento, no planteando esta posibilidad cuando el usuario al estacionar disponga de nivel de batería aceptable, independientemente de que el tiempo también lo sea, mientras que en el caso 1 sí se contempla posibilidad de carga lenta en esa misma situación. Por su parte, la demanda vinculada a la estrategia de carga sin control sigue más de cerca el patrón de distribución horaria de desplazamientos, ya que se está cargando cada vez que se finaliza un desplazamiento, siendo lógico pues que se concentre un mayor número de cargas en aquellas horas o franjas horarias asumidas como de mayor concentración de final de desplazamientos. Tal relación existente entre curva de demanda horaria y gráfica de distribución horaria de desplazamientos es común para las dos primeras estrategias estudiadas, estándar y sin control, diferenciando en este aspecto el tercer caso.

Analizando las curvas de demanda para el conjunto de usuarios de tipo privado profesional en función de la estrategia de carga que haya seguido el grupo, se puede observar que en los tres casos de estudio la demanda queda repartida a lo largo de intervalo de horas coincidente con la jornada laboral normal. Sí es cierto que en el caso específico de cargas controladas, estas quedan más repartidas a lo largo del día, siendo mayor este espaciamiento en el tiempo y más fluctuante el consumo para aquella estrategia más restrictiva o de menor número de carga a lo largo del día. Esto último también es lógico si se analiza la curva de cargas lentas y rápidas, donde puede observarse que esta estrategia recurre a carga rápida más frecuentemente, lo cual en términos de solicitud a red se traduce en picos de demanda para esos tiempos de carga. Por otra parte, en el caso de cargar cuando se para, se puede apreciar un mayor desplazamiento de la demanda hacia las horas correspondientes a la primera mitad del día, justo cuando este tipo de usuarios realiza más desplazamientos según los datos de distribución horaria de desplazamientos para este tipo de usuario para esta comunidad estudiada.

Centrando más el análisis en el modo de carga en que se realizan las mismas durante el día, es claro concluir que tanto en el caso de carga estándar como en el caso de carga sin control apenas se recurre a la realización de cargas rápidas, siendo incluso el consumo asociado a este modo insignificante, en términos de resultados globales de simulación, para el conjunto de usuarios privados personales. Es por esto último que no aparece representado en las gráficas revertidas por el programa para el cómputo global de la simulación. Sí pudo observarse durante el proceso de simulación a lo largo del desarrollo del presente proyecto, una mayor tendencia de la estrategia de carga sin control a recurrir al modo de carga rápida. No ocurre lo mismo cuando el

caso analizado es el de carga controlada con limitación de carga, en el cual se presentan frecuentes cargas en modo rápido y por valores mayores que las presentadas por el resto de casos. Además, para esta estrategia sí tiene representación significativa la carga rápida efectuada por usuarios de tipo privado personal. También puede apreciarse que las cargas rápidas con más frecuentes en horas correspondientes a la segunda mitad del día para aquellos casos en los que la carga sigue un cierto control, casos 1 y 3. Aspecto lógico ya que al limitar o controlar ciertas cargas se lleva a la batería a exprimir más su capacidad y esto puede conducir a que hacia las horas finales del día se produzcan situaciones críticas de carga.

Se puede concluir tras este estudio comparativo que, a pesar de que mediante una estrategia de carga controlada con ciertas limitaciones de carga se logra desplazar la curva de demanda hacia las horas finales del día, este tipo de estrategia lleva asociados ciertos picos muy pronunciados de demanda y un recurrimiento muy frecuente al modo de carga rápida. Es cierto que este tipo de carga se lleva a cabo en un tiempo más breve que la misma carga en modo lento, pero la potencia que ha de suministrar la red es significativamente mayor, poniendo en peligro la estabilidad de suministro de la misma. Por el contrario, si los usuarios de VE llevan a cabo cargas de manera desordenada y absolutamente descontroladas, se complica enormemente la previsión de demanda asociada a los VEs, dificultando pues su gestionabilidad. También es observable que el caso de estudio que presenta curvas de demanda más diferenciadas de los demás es el de carga controlada con limitación, existiendo intervalos horarios muy concretos y definidos de acumulación de solicitudes mientras que la mayoría de las horas del día estas son bajas o muy bajas. Así con todo, se considera demostrada la importancia de adquirir una serie de hábitos en lo referente a la carga de los VE y una concienciación, para lo cual es básico un mayor conocimiento acerca de este tipo de tecnología y del funcionamiento y operabilidad del sector eléctrico.

Como se menciona al principio, para que las conclusiones aquí extraídas sean coherentes y realistas, los datos de simulación que caracterizan los perfiles de movilidad, las necesidades de consumo y las decisiones de carga han de ser altamente semejantes en los tres casos estudiados. Para que pueda comprobarse la realidad del asunto, se unas tablas que reflejan tales datos y su semejanza. Además, al final de la presente memoria a modo de anexo se incluyen las gráficas adjuntadas a continuación, a mayor tamaño de manera que puedan ser analizadas de manera más cómoda individualmente. Mientras que en este tamaño permite tener todas las del mismo tipo juntas para un comparativa más visual entre estrategias.

TABLAS DE DATOS CALCULADOS EN LA SIMULACIÓN PARA CADA ESTRATEGIA DE CARGA

NÚMERO DE DESPLAZAMIENTOS POR USUARIO Y DÍA

USUARIO TIPO PRIVADO PERSONAL

	VALORES SIMULACIÓN CASO 1	VALORES SIMULACIÓN CASO 2	VALORES SIMULACIÓN CASO 3
Porcentaje de participación de este conjunto de usuarios	84.8%	85%	84.6%
Ratio desplazamiento/persona y día	3.81	3.90	3.92

Tabla 23. Número medio de desplazamientos por usuario de tipo privado personal y día para la comunidad simulada, en función de la estrategia de carga aplicada. Resultado de simulación.

USUARIO TIPO PRIVADO PROFESIONAL

	VALORES SIMULACIÓN CASO 1	VALORES SIMULACIÓN CASO 2	VALORES SIMULACIÓN CASO 1
Porcentaje de participación de este conjunto de usuarios	15.2%	15%	15.4%
Ratio desplazamiento/persona y día	7.91	7.96	7.80

Tabla 24. Número medio de desplazamientos por usuario de tipo privado profesional y día para la comunidad simulada, en función de la estrategia de carga aplicada. Resultado de simulación.

LONGITUD Y DURACIÓN MEDIA DE DESPLAZAMIENTO POR USUARIO Y DÍA

USUARIO TIPO PRIVADO PERSONAL

LONGITUDES	VALORES SIMULACIÓN CASO 1 [km]	VALORES SIMULACIÓN CASO 2 [km]	VALORES SIMULACIÓN CASO 3 [km]
Longitud media de cada desplazamiento por usuario y día	9.82	9.45	10.01
DURACIONES	VALORES SIMULACIÓN CASO 1 [min]	VALORES SIMULACIÓN CASO 2 [min]	VALORES SIMULACIÓN CASO 3 [min]
Duración media de cada desplazamiento por usuario y día	15.05	14.60	15.10

Tabla 25. Longitudes y duraciones medias por desplazamiento para usuarios privados personales de la comunidad simulada, en función de la estrategia de carga aplicada. Resultados de simulación.

USUARIO TIPO PRIVADO PERSONAL

LONGITUDES	VALORES SIMULACIÓN CASO 1 [km]	VALORES SIMULACIÓN CASO 2 [km]	VALORES SIMULACIÓN CASO 3 [km]
Longitud media de cada desplazamiento por usuario y día	8.64	8.79	9.28
DURACIONES	VALORES SIMULACIÓN CASO 1 [min]	VALORES SIMULACIÓN CASO 2 [min]	VALORES SIMULACIÓN CASO 3 [min]
Duración media de cada desplazamiento por usuario y día	13.72	13.91	14.31

Tabla 26. Longitudes y duraciones medias por desplazamiento para usuarios privados profesionales de la comunidad simulada, en función de la estrategia de carga aplicada. Resultados de simulación.

CONSUMO ELÉCTRICO MEDIO

CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

CONSUMOS MEDIOS SEGÚN TIPO DE USUARIO	RESULTADO SIMULACIÓN CASO 1 [kWh]	RESULTADO SIMULACIÓN CASO 1 [kWh]	RESULTADO SIMULACIÓN CASO 1 [kWh]
Consumo medio de un usuario privado personal	5.96	5.80	6.20
Consumo medio de un usuario privado profesional	11.80	11.50	11.60
CONSUMOS TOTALES SEGÚN MODO DE CARGA	RESULTADO SIMULACIÓN CASO 1 [kWh]	RESULTADO SIMULACIÓN CASO 1 [kWh]	RESULTADO SIMULACIÓN CASO 1 [kWh]
Consumo total en Carga Lenta	3372.3	3351.9	3285.84
Consumo total en Carga Rápida	19.102	9.30	106.26
Consumo Total	3391.40	3361.20	3402.10

Tabla 27. Consumos eléctricos medios por usuario según tipo de usuario y consumos eléctricos totales según modo de carga, para la comunidad simulada en función de la estrategia de carga aplicada. Resultados de simulación.

CURVAS DE DEMANDA TOTAL CARACTERÍSTICAS SEGÚN ESTRATEGIA DE CARGA ANALIZADA

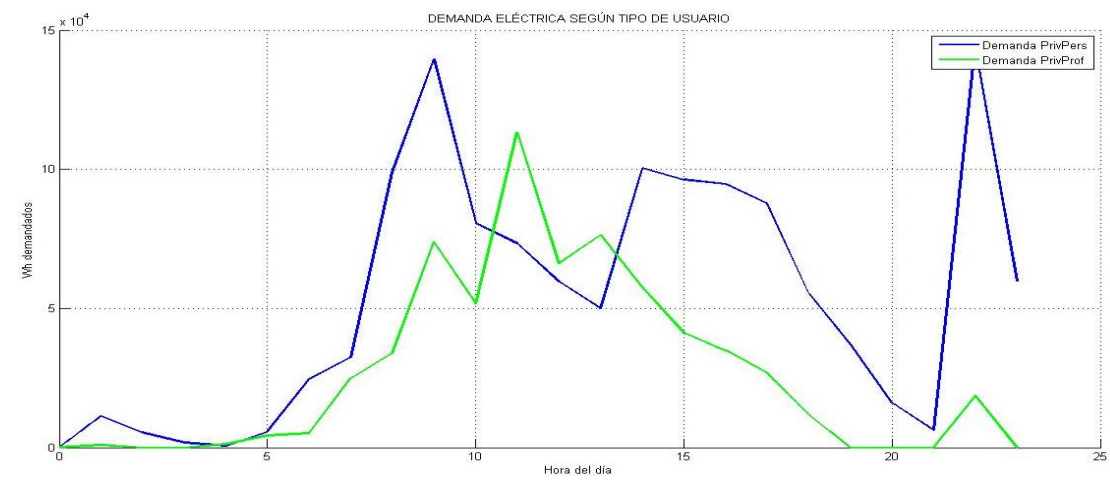


Imagen 33. Curva de demanda horaria en función del tipo de usuario para el caso 1. Resultados de simulación.

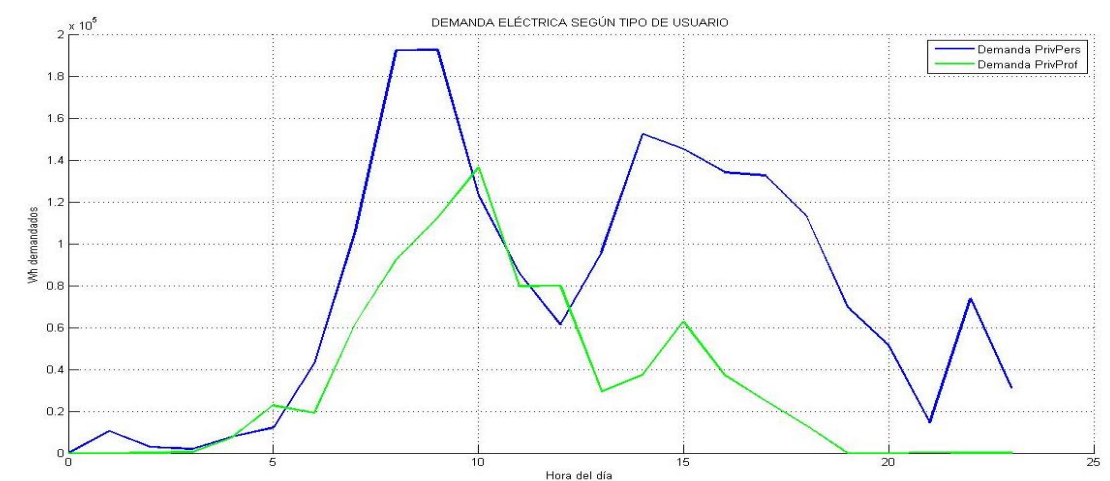


Imagen 34. Curva de demanda horaria en función del tipo de usuario para el caso 2. Resultados de simulación.

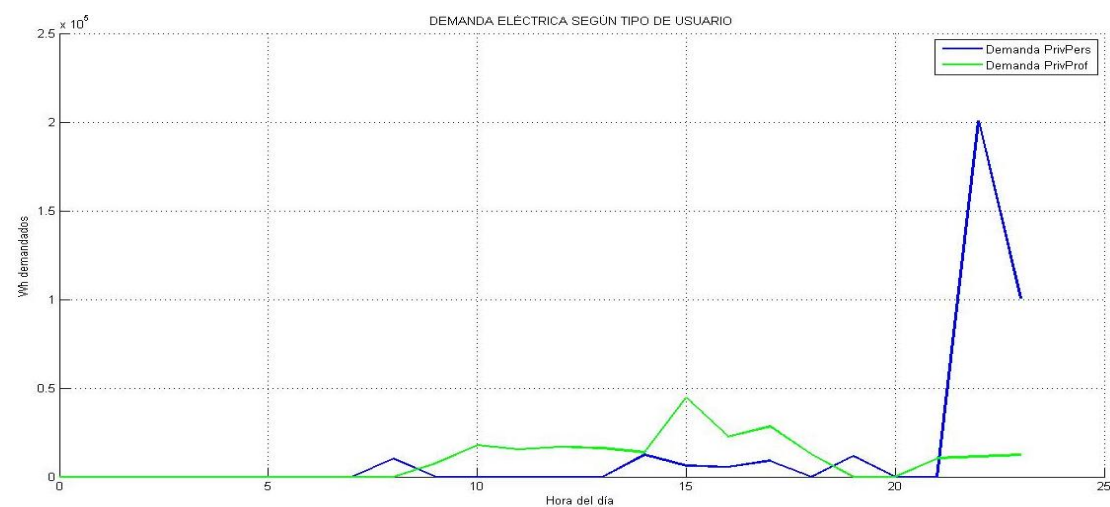


Imagen 35. Curva de demanda horaria en función del tipo de usuario para el caso 3. Resultados de simulación.

CURVAS DE DEMANDA SEGÚN MODO DE CARGA DE CADA ESTRATEGÍA ANALIZADA

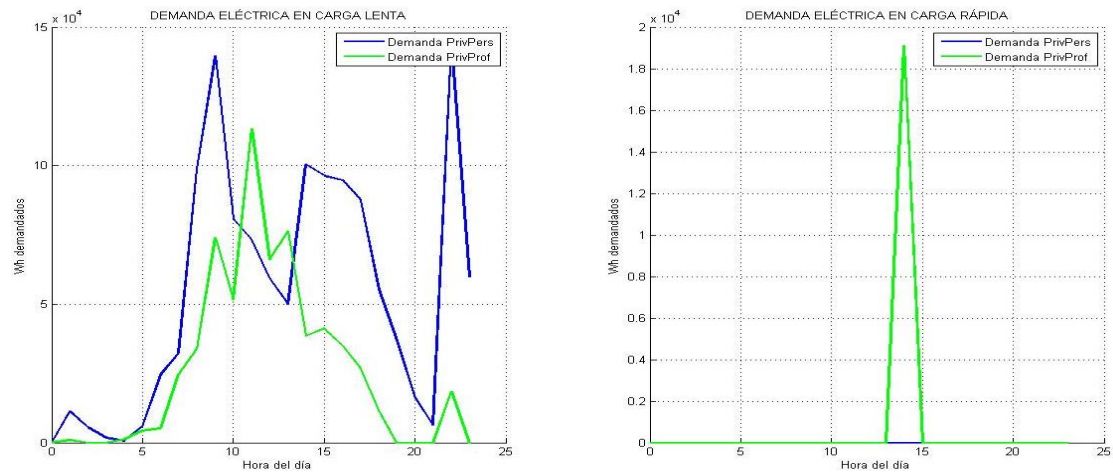


Imagen 36. Curva de demanda horaria en función del modo de carga para el caso 1. Resultados de simulación.

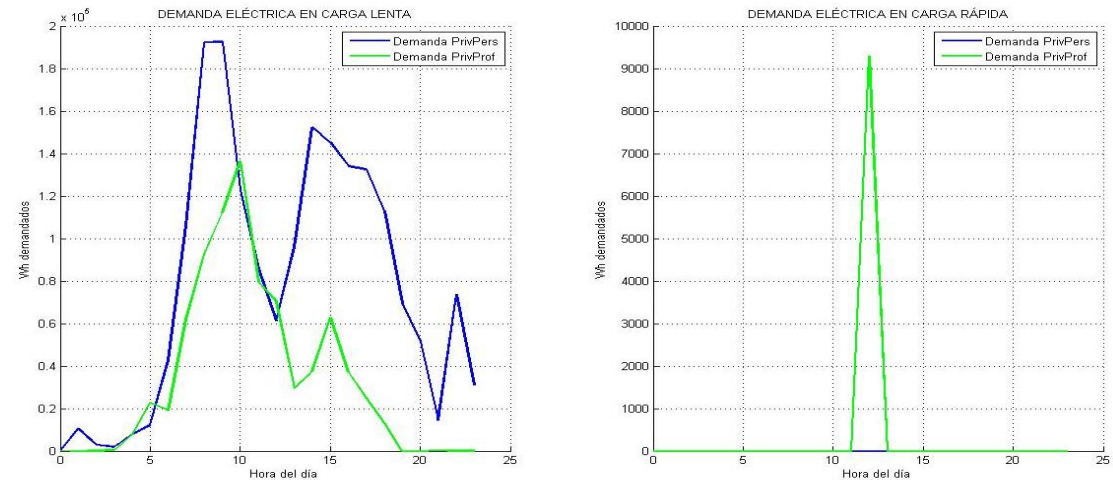


Imagen 37. Curva de demanda horaria en función del modo de carga para el caso 2. Resultados de simulación.

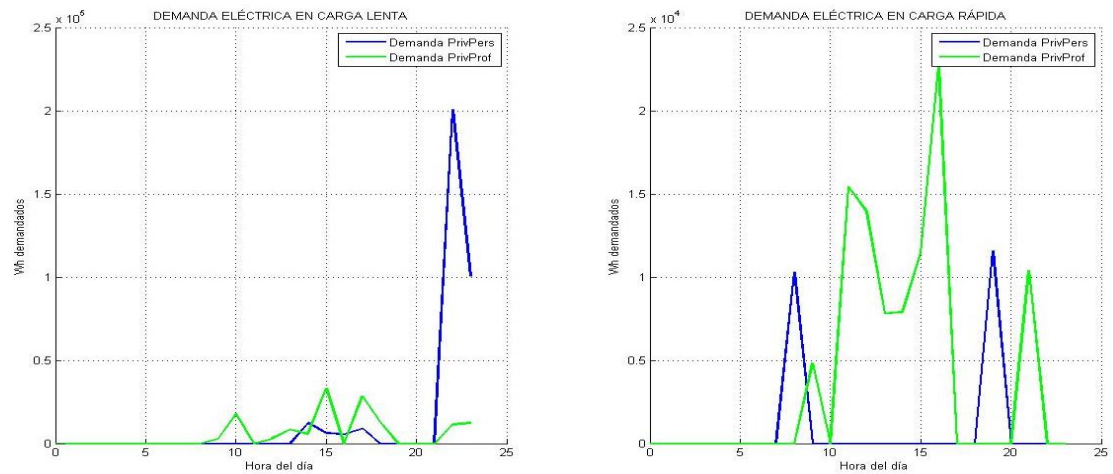


Imagen 38. Curva de demanda horaria en función del modo de carga para el caso 3. Resultados de simulación.

CURVAS DE DEMANDA TOTAL DE TODOS LOS USUARIOS DE CADA ESTRATEGÍA ANALIZADA

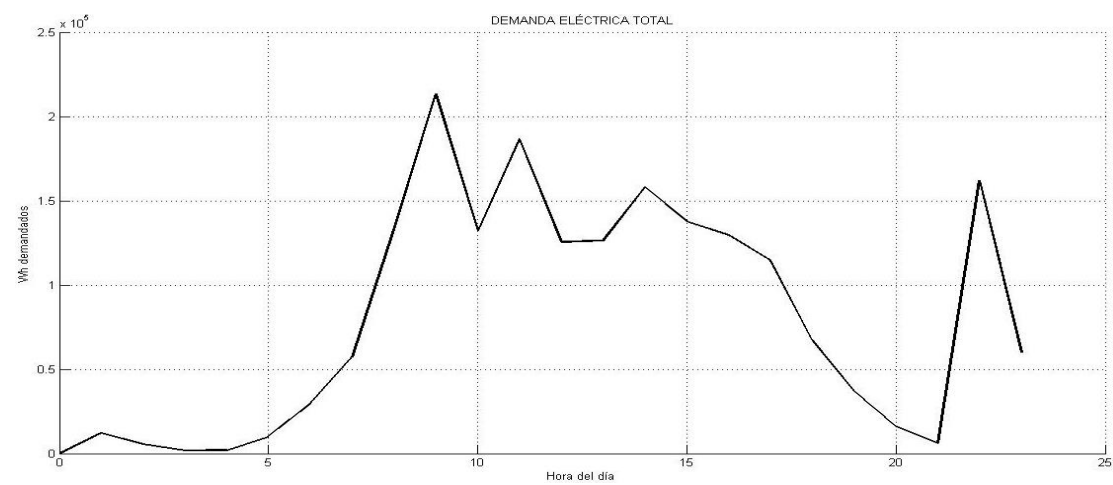


Imagen 39. Curva de demanda horaria total para el caso 1. Resultados de simulación.

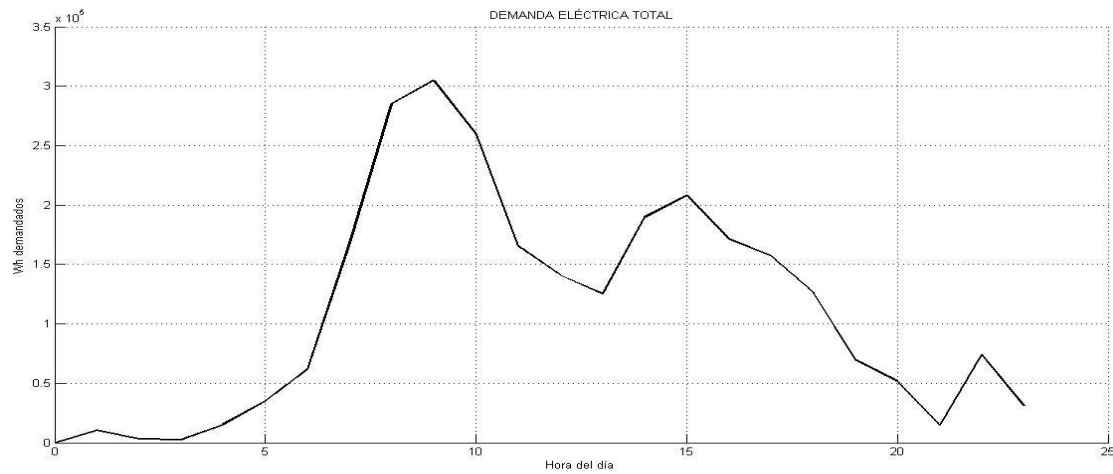


Imagen 40. Curva de demanda horaria total para el caso 2. Resultados de simulación.

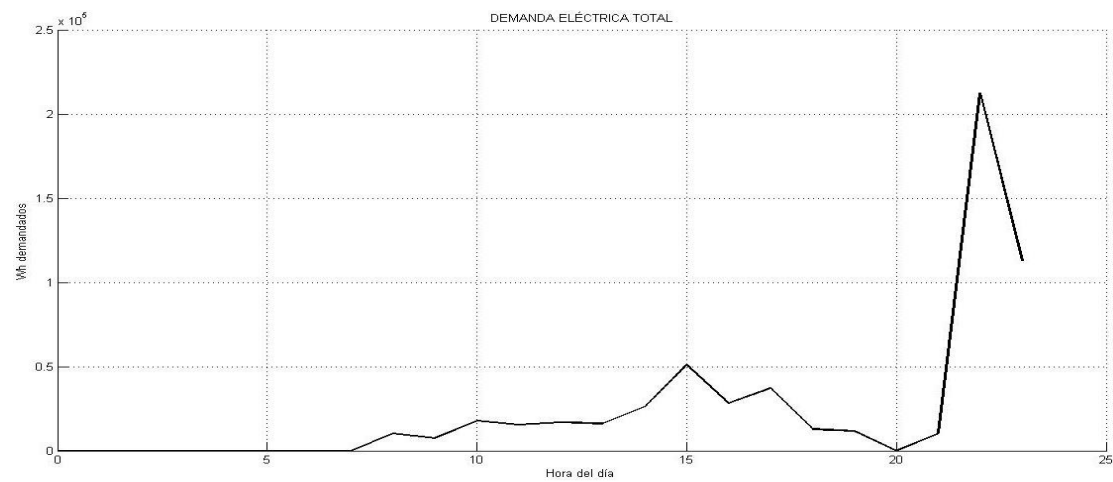


Imagen 41. Curva de demanda horaria total para el caso 3. Resultados de simulación.

CONCLUSIONES

1. ANÁLISIS DE OBJETIVOS Y CONCLUSIONES GENERALES

El objetivo principal de este trabajo ha sido el aportar una metodología para la simulación del comportamiento de una comunidad cualquiera de vehículos eléctricos, a fin de lograr el modelado de la potencia demandada a la red por la misma. Con objeto de obtener unos resultados lo más realistas posibles, que verdaderamente puedan llegar a ser utilizados para su inclusión en una red de distribución logrando la simulación de los flujos de potencia existentes entre red y vehículos, se ha elaborado un modelo estocástico capaz de simular la demanda eléctrica de una comunidad cualquiera de VEs teniendo en cuenta la aleatoriedad y variabilidad temporal característica de toda situación real, recurriendo a la técnica Monte Carlo, distribuciones probabilísticas y generaciones aleatorias o pseudoaleatorias de situaciones y decisiones.

En base a los resultados obtenidos se puede concluir, por un lado, que el objetivo de alcanzar un modelo de simulación altamente realista ha sido logrado, ya que:

- El programa elaborado es capaz de generar perfiles de movilidad particulares para cada usuario de los que se le indique que van a participar. En tales perfiles se refleja una amplia variedad de situaciones que pueden darse en el entorno real, diferentes y adaptadas a cada tipo de usuario, reconociendo diferentes tipos en función de los desplazamientos que estos hagan y diferentes motivos que les llevan a desplazarse. Pero siendo los valores medios característicos de la comunidad simulada altamente similares a los reales introducidos, que le indican al programa la clase de comunidad que se desea estudiar.
- En ningún momento se da solapamiento entre desplazamiento de un mismo usuario, de manera que no empieza ningún desplazamiento sin haber acabado previamente el anterior. Además nunca empiezan dos desplazamientos simulados para el mismo usuario a la misma hora y nunca acaba ninguno más allá del momento tope de simulación indicado.
- Tiene en cuenta diferentes modelos de VEs reales otorgándole a cada usuario uno de manera pseudoaleatoria, eligiéndolo de forma tal que se ajuste a las necesidades propias del citado usuario.

- Estudia las necesidades de carga de cada usuario y le asocia un perfil de cargas en función de las mismas, asegurando que en ningún momento ninguno de ellos se quedará sin batería en mitad de un desplazamiento. Para ello, siempre dando prioridad a la carga lenta, valora la posibilidad de recurrir a carga rápida en situaciones que pongan en peligro la garantía de autonomía.

Por otro lado, se ha alcanzado el objetivo de aportar un modelo que reporte una visión bastante clara del comportamiento de una comunidad de VEs en su implantación en un entorno urbano. Y que permita, además, analizar la adaptación y evolución de ese comportamiento ante variaciones en el entorno tales como las estrategias de carga, los horarios y tarifas de tales cargas, número de VEs considerados, modos de carga seleccionados, velocidad de circulación, tamaño de comunidad, y un largo etcétera, tan solo modificando las variables de entrada. Es decir, es un programa versátil y perfectamente adaptable a multitud de entornos y circunstancias urbanas diferentes.

En esta línea, y lo que ha sido considerado uno de los análisis más interesantes de los que se han llevado a cabo durante su elaboración, el modelo creado permite comprobar cómo una misma comunidad varía enormemente su comportamiento de demanda en función de la estrategia de carga que siga. Es decir, tras la simulación se ha podido comprobar como para unos resultados de consumos eléctricos globales prácticamente idénticos, las curvas de demanda que indican el reparto de tal consumo durante el intervalo temporal de simulación presentan perfiles completamente diferentes, que a su vez están claramente relacionados con la propia estrategia de carga que siguen los usuarios. Por supuesto los resultados relativos a la caracterización de la comunidad son igualmente semejantes para todos los casos, indicativos de igualdad de modelo y el realismo del mismo.

En vistas a las curvas de demanda y a los cálculos de consumos reportados por el programa, se concluye la necesidad de desarrollar estudios técnicos en este referente que permitan el análisis y dimensionamiento del impacto, así como de las posibilidades de los VEs en el sector eléctrico actual. Se observa que la conexión a red de estos vehículos generará unos nuevos picos de demanda en las mismas que habrán de sumarse a los propios de la demanda convencional, siendo altamente importante el diseño de las estrategias de carga para la viabilidad de la nueva tecnología, al quedar claro la elevada influencia que esto tiene en los picos de demanda mencionados (tanto en los momentos que se dan, como en el valor en kWh de los mismos y la frecuencia con la que se presentan). Queda patente también la necesidad de existencia de

tecnología de carga rápida para asegurar la autonomía de los vehículos eléctricos puros, a modo de salvoconducto ante situaciones severas por el nivel de batería y el tiempo para la carga disponibles.

2. ANÁLISIS DE POSIBLES MEJORAS AL MODELO ELABORADO Y TRABAJOS FUTUROS

Un posible desarrollo del programa es mejorar la forma en la que el mismo solicita las variables dato de entrada de las que hace uso, mediante la creación de una interfaz que resulte más atractiva y amena al usuario. Este desarrollo sería meramente estético, con el objetivo de facilitar el uso y mejorar la experiencia del usuario con el programa.

A modo de desarrollo técnico se propone la inclusión de aquellos usuarios de tipo público profesional, que han quedado excluidos aquí, dedicados en su mayoría al transporte de personas. Para ello se habría de profundizar en el estudio de los hábitos de movilidad y las necesidades de consumo de los mismos. Además se habrían de diseñar nuevos planes de carga, al estar este tipo de VEs gestionados por entidades públicas que se supone no optarán por la recarga de los mismo en cualquier puesto de carga disponible en la ciudad, a diferencia de lo ocurrido con los usuarios de carácter privado.

El siguiente paso para este trabajo sería su inclusión en una red de distribución de prueba, como las aportadas por el IEEE, estudiando el comportamiento de la misma al tener que responder a esta nueva carga asociada. De esta manera se podría realizar un análisis de los flujos de potencia, como concepto propiamente estudiado en redes, y comprobación del comportamiento de los diferentes nudos de la red y los centros de transformación encargados de suplir la energía demandada ante la inclusión de esta nueva carga asociada.

También se podría incluir a posibilidad de utilizar en la simulación batería con tecnologías distintas a las de Ion-Litio, incluyendo los perfiles de carga propios de cada tecnología. Consiste este en un interesante estudio de cara a la introducción del programa en una red de distribución, ya que permitirá tener en cuenta las variaciones en los valores de potencia durante el tiempo de carga de cada VE, debido a que cada tecnología de batería realiza la carga de diferente manera lo cual influye en la forma en que la red ha de suplir la energía necesaria a cada VE.

Como puede verse, los trabajos futuros que se proponen están orientados a la inclusión de la población de VEs en el sector eléctrico, teniendo esto su máxima expresión en el estudio y simulación de sistemas V2G. En este sentido sería interesante desarrollar el programa aquí elaborado de manera que se permita el recuento de capacidad disponible en las baterías de aquellos vehículos que se encuentren estacionados. Dicha capacidad quedaría, en los sistemas V2G, a disposición de la red tanto para absorber la potencia disponible en las mismas e inyectarla en los puntos donde así se requiera, como en aprovechar estas como almacenamiento distribuido en momentos de exceso de generación, evitando la necesidad de recurrir a vertidos de energía como ocurre en la actualidad. Así pues consistiría en la ampliación del presente trabajo siguiendo la línea de la simulación de los flujos de potencia bidireccionales y no la simulación exclusiva de la energía absorbida en un único sentido, por el VE desde la red.

PRESUPUESTO

Presupuesto

Capítulo 1. Mano de obra

La presente partida detalla el presupuesto asociado a la mano de obra, desde el proceso inicial de documentación e investigación hasta la redacción final de la memoria y sus correcciones y modificaciones. Se incluye así mismo las horas correspondientes a la elaboración y programación del modelo creado.

Orden	Descripción	Coste/hora [€/h]	Duración [horas]	Importe [€]
1.1	Documentación e investigación	25,00	160,00	4.000,00
1.2	Elaboración y programación del modelo	25,00	160,00	4.000,00
1.3	Redacción y elaboración de la memoria	25,00	80,00	2.000,00
TOTAL			400,00 h	10.000,00 €

Presupuesto

Capítulo 2. Material informático

La presente partida incluye el presupuesto destinado al material informático del cual se ha hecho uso.

Orden	Descripción	Coste/Ud. [€]	Depreciación [meses]	Utilización [meses]	Importe [€]
2.1	MATLAB®	6.000,00	24	5	1.250,00
2.2	Ordenado	500,00	24	5	104,17
TOTAL					1.354,17 €

Resumen de capítulos

Se detalla a continuación el presupuesto total del presente proyecto.

Cap.	Descripción	Importe [€]
1	Mano de obra	10.000,00
2	Material informático	1.354,17

IMPORTE TOTAL (SIN IVA)	11.354,17 €
IVA	21,00 %
IMPORTE TOTAL	13.738,54 €

ANEXO I. CÁLCULOS PREVIOS Y TABLAS DE VARIABLES USADAS

```
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%

%NÚMERO MEDIO DE DESPLAZAMIENTOS POR PERSONA Y DÍA
nDmedio=((PorcUsPriv*nDPriv)+(PorcUsProf*nDProf))/100;

%DISTRIBUCIÓN HORARIA DE LOS DESPLAZAMIENTOS
for i=1:24;
    DPrivPers(i)=DPersonal(i)+DOcupacional(i);

    DistribSegunUs(i,1)=DPrivPers(i);
    DistribSegunUs(i,2)=DProfesional(i);

    DistribSegunMot(i,1)=DPersonal(i);
    DistribSegunMot(i,2)=DOcupacional(i);
end

%PROBABILIDAD HORARIA DE DESPLAZAMIENTO
for i=1:24;

    TotalDPersonal=sum(DPersonal); %Numero despl por mot personal/dia
    ProbDPersonal(i)=DPersonal(i)/TotalDPersonal;

    TotalDOcupacional=sum(DOcupacional);
    ProbDOcupacional(i)=DOcupacional(i)/TotalDOcupacional;

    TotalDPrivado=TotalDPersonal+TotalDOcupacional;

    TotalDProfesional=sum(DProfesional);
    ProbDProfesional(i)=DProfesional(i)/TotalDProfesional;

    i=i+1;
end
```

```
%PROBABILIDADES ACUMULADAS HORARIA DE DESPLAZAMIENTO
PacumuladaDPersonal=cumsum(ProbDPersonal);
PacumuladaDOcupacional=cumsum(ProbDOcupacional);
PacumuladaDProfesional=cumsum(ProbDProfesional);

%LONGITUD MEDIA DE DESPLAZAMIENTO
%Desplazamiento Externo
LongMediaExt=VExterno*DuracMediaExt; %En [km]
%Desplazamiento Interno
LongMediaInt=VInterno*DuracMediaInt; %En [km]

%Desplazamiento individual diario -> Usuario Privado Personal
DuracMediaDPriv=((DuracMediaExt*PorcDExtPriv)+(DuracMediaInt*PorcDIntPriv))/100; %En [horas]
LongMediaDPriv=((LongMediaExt*PorcDExtPriv)+(LongMediaInt*PorcDIntPriv))/100; %En [km]
%Desplazamiento individual diario -> Usuario Privado Personal
DuracMediaDProf=((DuracMediaExt*PorcDExtProf)+(DuracMediaInt*PorcDIntProf))/100; %En [horas]
LongMediaDProf=((LongMediaExt*PorcDExtProf)+(LongMediaInt*PorcDIntProf))/100; %En [km]

%MODELOS DE VE CON CONSUMOS MÁXIMO Y MÍNIMO
%Catálogo para Usuario Privado Personal
%Modelo de consumo MÁXIMO
ConsumoVE_PrivMax=max(max(ConsumoVE_Priv)); %En [Wh/km]
ModConMaxPriv=find(ConsumoVE_Priv==max(max(ConsumoVE_Priv)));
CapBatModConMaxPriv=CapacidadBateriaPriv(ModConMaxPriv); %En [Wh]
%Modelo de consumo Mínimo
ConsumoVE_PrivMin=min(min(ConsumoVE_Priv)); %En [Wh/km]
ModConMinPriv=find(ConsumoVE_Priv==min(min(ConsumoVE_Priv)));
CapBatModConMinPriv=CapacidadBateriaPriv(ModConMinPriv); %En [Wh]
%Catálogo para Usuario Privado Personal
%Modelo de consumo MÁXIMO
ConsumoVE_ProfMax=max(max(ConsumoVE_Prof)); %En [Wh/km]
ModConMaxProf=find(ConsumoVE_Prof==max(max(ConsumoVE_Prof)));
CapBatModConMaxProf=CapacidadBateriaProf(ModConMaxProf); %En [Wh]
%Modelo de consumo MÍNIMO
ConsumoVE_ProfMin=min(min(ConsumoVE_Prof)); %En [Wh/km]
ModConMinProf=find(ConsumoVE_Prof==min(min(ConsumoVE_Prof)));
CapBatModConMinProf=CapacidadBateriaProf(ModConMinProf); %En [Wh]
```

```
%POTENCIA SUMINISTRADA POR PUESTO DE CARGA Y POTENCIA REAL A BATERÍA
%En Modo de Carga Lenta
PotenciaCL=TensionCL*IntensidadCL; %[W]
PotenciaCLReal=PotenciaCL*((100-PerdidasCL)/100); %[W]
%En Modo de Carga Rápida
PotenciaCR=TensionCR*IntensidadCR; %[W]
PotenciaCRReal=PotenciaCR*((100-PerdidasCR)/100); %[W]

%COSTE DE LA ENERGÍA CONSUMIDA

%Con tarifa sin discriminación horaria
CosteEnergiaSinDis=CosteEnergiaSinD/1000; %€/Wh
%Con tarifa con discriminación horaria
%Hora Pico
CosteEnergiaConDisPunta=CosteEnergiaConDisP/1000; %€/Wh
%Hora Valle
CosteEnergiaConDisValle=CosteEnergiaConDisV/1000; %€/Wh
```

VARIABLE DATO DE ENTRADA DESCRIPCIÓN

VARIABLES RELATIVAS A MOVILIDAD URBANA

NumUsuarios	Número de VEs que conforman la población objeto de estudio
nDPriv	Número medio de desplazamientos por persona y día para el tipo de usuario privado personal
PorcUsPriv	Porcentaje de población representada por usuarios de tipo privado personal
nDProf	Número medio de desplazamientos por persona y día para un tipo de usuario privado profesional
PorcUsProf	Porcentaje de población representada por usuarios de tipo privado profesional
DPersonal(i)	Número de desplazamientos realizados por usuarios de tipo privado personal por motivo personal a cada hora del día (i) (distribución horaria de desplazamientos).
DOcupacional(i)	Número de desplazamientos realizados por usuarios de tipo privado personal por motivo ocupacional a cada hora del día (i) (distribución horaria de desplazamientos).
DProfesional(i)	Número de desplazamientos realizados por usuarios e tipo privado profesional a cada hora del día (i) (distribución horaria de desplazamientos)
DuracMediaExt	Duración media de un desplazamiento de tipo externo, expresada en horas.
VExterno	Velocidad promedio asociada a un desplazamiento de tipo externo, expresada en km/h.
PorcDExtPriv	Porcentaje de desplazamientos de tipo externo realizados por usuarios de tipo privado personal, en relación al total de desplazamiento realizados por este tipo de usuarios.
PorcDExtProf	Porcentaje de desplazamientos de tipo externo realizados por usuarios de tipo privado profesional, en relación al total de desplazamiento realizados por este tipo de usuarios.
DuracMedialnt	Duración media de un desplazamiento de tipo interno, expresada en horas.
VInterno	Velocidad promedio asociada a un desplazamiento de tipo interno, expresada en km/h.
PorcDIntPriv	Porcentaje de desplazamientos de tipo interno realizados por usuarios de tipo privado personal, en relación al total de desplazamiento realizados por este tipo de usuarios.
PorcDIntProf	Porcentaje de desplazamientos de tipo interno realizados por usuarios de tipo privado profesional, en relación al total de desplazamiento realizados por este tipo de usuarios.
LongitudLimite	Longitud delimitante de desplazamiento tipo interno y desplazamiento tipo externo, expresada en km.

VARIABLES RELATIVAS A VEHÍCULO ELÉCTRICO

CapacidadBateriaPriv(m)	Capacidad de la batería del modelo de vehículo número m, del catálogo para usuarios de tipo privado personal, expresada en Wh.
ConsumoVE_Priv(m)	Consumo eléctrico del modelo de vehículo número m, del catálogo para usuarios de tipo privado personal, expresado en Wh/km.
CapacidadBateriaProf(mP)	Capacidad de la batería del modelo de vehículo número mP, del catálogo para usuarios de tipo privado profesional, expresada en Wh.
ConsumoVE_Prof(mP)	Consumo eléctrico del modelo de vehículo número mP, del catálogo para usuarios de tipo privado profesional, expresado en Wh/km.

VARIABLES RELATIVAS A CARGA

TensiónCL	Tensión del puesto de carga para modo de carga lenta, expresada en V.
IntensidadCL	Intensidad aportada por el puesto de carga para modo de carga lenta, expresada en A.
PerdidasCL	Porcentaje de pérdidas asociadas a la tecnología de ese puesto de carga para modo de carga lenta.
TensiónCR	Tensión del puesto de carga para modo de carga rápida, expresada en V.
IntensidadCR	Intensidad aportada por el puesto de carga para modo de carga rápida, expresada en A.
PerdidasCR	Porcentaje de pérdidas asociadas a la tecnología de ese puesto de carga para modo de carga rápida.
CosteEnergiaSinD	Coste de la energía consumida para una tarifa sin discriminación horaria, expresado en €/kWh.
CosteEnergiaConDisP	Coste de la energía consumida para una tarifa con discriminación horaria en hora pico, expresado en €/kWh.
CosteEnergiaConDisV	Coste de la energía consumida para una tarifa con discriminación horaria en hora valle, expresado en €/kWh.
HoraMin	Hora de inicio de aplicación de tarifa en hora pico.
HoraMax	Hora de fin de aplicación de tarifa en hora pico.
ImpuestosElect	Factor correspondiente al Impuesto Especial sobre la electricidad, aplicado en toda tarifa eléctrica.

VARIABLE RESULTADO DE CÁLCULOS DEL PROGRAMA	DESCRIPCIÓN
VARIABLES RELATIVAS A MOVILIDAD URBANA	
nDmedio	Número medio de desplazamientos por persona y día para la comunidad objeto de estudio.
DPrivPers(i)	Número de desplazamientos realizados por usuarios de tipo privado personal a cada hora del día por cualquier motivo considerado (distrib horaria de desplazamientos).
TotalDPersonal	Número total de desplazamiento realizados por usuarios de tipo privado personal por motivo personal.
ProbDPersonal(i)	Probabilidad de ocurrencia de un desplazamiento por motivo personal para cada hora del día (i).
TotalDOcupacional	Número total de desplazamiento realizados por usuarios de tipo privado personal por motivo ocupacional.
ProbDOcupacional(i)	Probabilidad de ocurrencia de un desplazamiento por motivo ocupacional para cada hora del día (i).
TotalDPrivado	Número total de desplazamientos realizados por usuarios de tipo privado personales, independientemente del motivo por el cual se realizan.
TotalDProfesional	Número total de desplazamiento realizados por usuarios de tipo privado profesional.
ProbDProfesional(i)	Probabilidad de ocurrencia de un desplazamiento realizado por un usuario de tipo privado profesional para cada hora del día (i).
PAcumuladaDPersonal	Probabilidad acumulada de desplazamiento realizado por un usuario de tipo privado personal por motivo personal.
PAcumuladaDOcupacional	Probabilidad acumulada de desplazamiento realizado por un usuario de tipo privado personal por motivo ocupac.
PAcumuladaDProfesional	Probabilidad acumulada de desplazamiento realizado por un usuario de tipo privado profesional.
LongMediaExt	Longitud media de un desplazamiento de tipo externo, expresada en km.
LongMediaInt	Longitud media de un desplazamiento de tipo interno, expresada en km.
DuracMediaDPriv	Duración media de un desplazamiento realizado por un usuario de tipo privado personal, expresada en horas.
LongMediaDPriv	Longitud media de un desplazamiento realizado por un usuario de tipo privado personal, expresada en km.
DuracMediaDProf	Duración media de un desplazamiento realizado por un usuario de tipo privado profesional, expresada en horas.
LongMediaDPriv	Longitud media de un desplazamiento realizado por un usuario de tipo privado personal, expresada en km.

VARIABLES RELATIVAS A VEHÍCULO ELÉCTRICO	
ConsumoVE_PrivMax	Consumo eléctrico máximo de todos los modelos de vehículos m del catálogo para usuarios privados personales, expresado en Wh/km.

ModConMaxPriv	Modelo de vehículo m del catálogo para usuarios de tipo privado personal al que corresponde el consumo máximo.
CapBatModConMaxPriv	Capacidad de la batería del modelo de vehículo m del catálogo para usuarios de tipo privado personal al que corresponde el consumo máximo.
ConsumoVE_PrivMin	Consumo eléctrico mínimo de todos los modelos de vehículos m del catálogo para usuarios privados personal, expresado en Wh/km.
ModConMinPriv	Modelo de vehículo m del catálogo para usuarios de tipo privado personal al que corresponde el consumo mínimo.
CapBatModConMinPriv	Capacidad de la batería del modelo de vehículo m del catálogo para usuarios de tipo privado personal al que corresponde el consumo mínimo.
ConsumoVE_ProfMax	Consumo eléctrico máximo de todos los modelos de vehículos m del catálogo para usuarios privados profesional, expresado en Wh/km.
ModConMaxProf	Modelo de vehículo m del catálogo para usuarios de tipo privado profesional al que corresponde el consumo máximo.
CapBatModConMaxProf	Capacidad de la batería del modelo de vehículo m del catálogo para usuarios de tipo privado profesional al que corresponde el consumo máximo.
ConsumoVE_ProfMin	Consumo eléctrico mínimo de todos los modelos de vehículos m del catálogo para usuarios privados profesional, expresado en Wh/km.
ModConMinProf	Modelo de vehículo m del catálogo para usuarios de tipo privado profesional al que corresponde el consumo mínimo.
CapBatModConMinProf	Capacidad de la batería del modelo de vehículo m del catálogo para usuarios de tipo privado profesional al que corresponde el consumo mínimo.

VARIABLES RELATIVAS A CARGA

PotenciaCL	Potencia teórica suministrada por el puesto de recarga en modo de carga lenta, en W.
PotenciaCLReal	Potencia real, tras descontar pérdidas, que le llega a la batería del VE de toda la PotenciaCL, en W.
PotenciaCR	Potencia teórica suministrada por el puesto de recarga en modo de carga rápida, en W.
PotenciaCRReal	Potencia real, tras descontar pérdidas, que le llega a la batería del VE de toda la PotenciaCR, en W.
CosteEnergiaSinDis	Coste de la energía consumida para una tarifa sin discriminación horaria, expresado en €/Wh.
CosteEnergiaCinDisPunta	Coste de la energía consumida para una tarifa con discriminación horaria en hora pico, expresado en €/Wh.
CosteEnergiaCinDisValle	Coste de la energía consumida para una tarifa con discriminación horaria en hora valle, expresado en €/Wh.

ANEXO II. TABLAS DE MODELOS DE VE

En este anexo se aportan tres tablas que detallan las características técnicas y constructivas de los modelos de VE más representativos del parque automovilístico español. Todos estos modelos se encuentran recogidos dentro del Plan Movele, de ayudas a la financiación y con ánimo de incentivar la compra de VEs por parte de los usuarios españoles. La primera de las tablas se centra en los detalles de pesos y dimensiones características de los citados modelos, en la segunda se detallan los datos técnicos de los motores y sus prestaciones mientras que la tercera de las tablas se centra en los aspectos técnicos y característicos de las baterías.

DATOS TÉCNICOS. PESOS Y DIMENSIONES							
MARCA	MODELO	TIPO	PESO CON BATERIAS (kg)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ALTO (mm)	PLAZAS
Audi	A3 Sportback e-tron	PHEV	1615	4312	1758	1424	5
BMW I	I3 REX	REEV	1390	3999	1775	1578	4
BMW I	I3	BEV	1270	3999	1775	1578	4
BMW I	I8	phev	1560	4689	1942	1291	4
CHEVROLET	VOLT	REEV	1735	4498	1787	1439	4
CITROËN	C-ZERO Alrdream Seduction	BEV					
KIA	SOUL Eléctrico (*)	BEV		4140	1800	1593	5
MERCEDES-BENZ	S500 Plug-in Hybrid	PHEV		5293	1914	1501	5
MITSUBISHI	O-MIEV	BEV	1160	3475	1475	1610	4
MITSUBISHI	OUTLANDER (**)	PHEV	1885	4655	1800	1673	5
OPEL	AMPERA	REEV	1735	4498	1787	1439	4
PEUGEOT	ION	BEV		3000	1000	2000	4
PORSCHE	PANAMERA	PHEV		5015	1931	1418	4
RENAULT	ZOE	BEV	1468	4084	1730	1562	5
SMART	FORTWO Eletrive Drive	BEV		2695	1559	1565	2
TAZZARI EV	EM1 ANNIVERSARY (***)	BEV	735	2880	1560	1425	2
VOLKSWAGEN	E-GOLF	BEV	1585	4270	1799	1450	5
VOLKSWAGEN	E-UP!	BEV	1214	3540	1645	1492	4
BYD	E6	BEV	2455	4560	1822	1645	5
NISSAN	LEAF	BEV	1548	4445	1770	1550	5
RENAULT	FLUENCE ZE	BEV	1605	4748	1813	1477	5
TOYOTA	PRIUS Plug-in Hybrid	PHEV	1577	4480	1745	1490	5

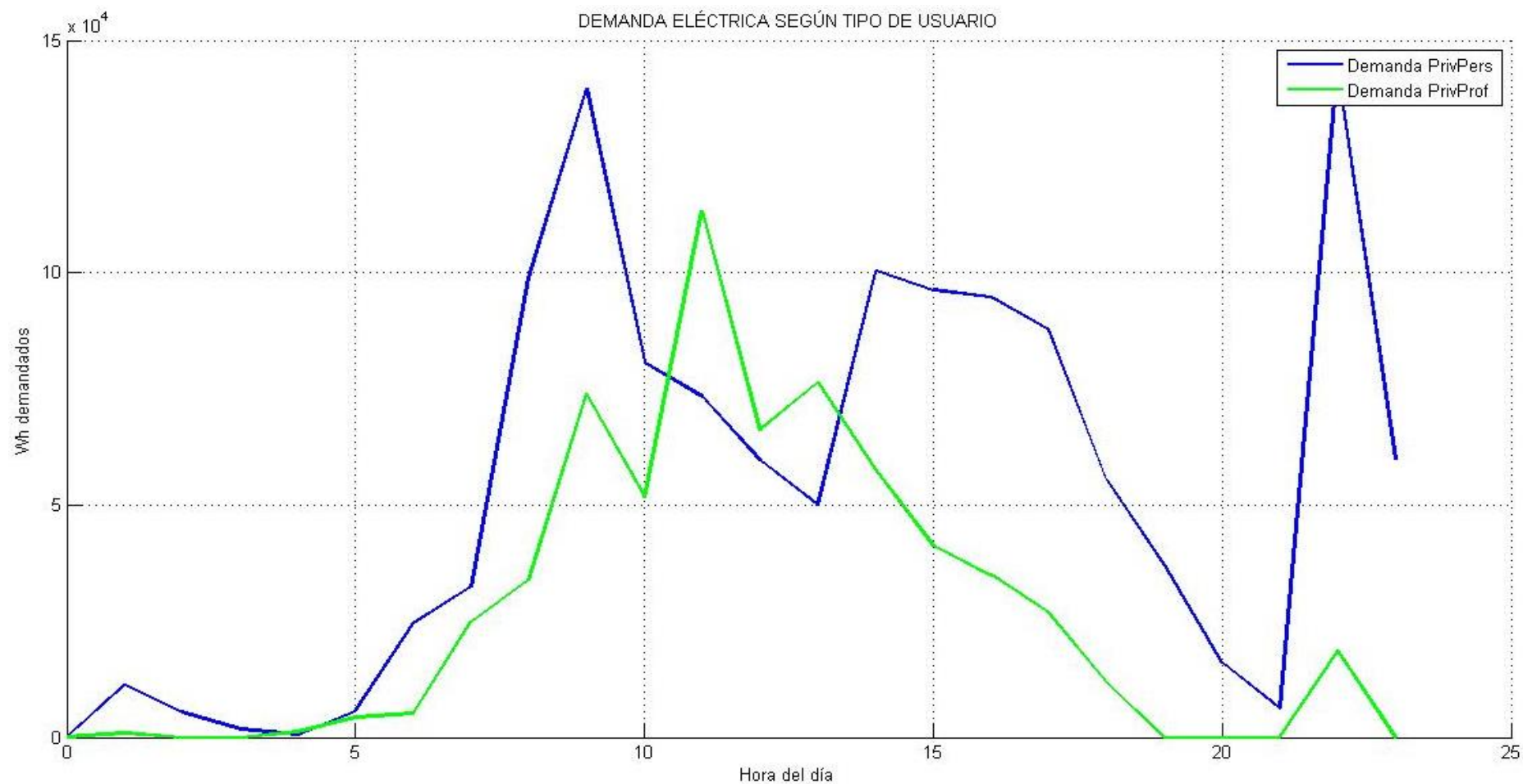
DATOS TÉCNICOS. MOTOR Y PRESTACIONES							
MARCA	MODELO	TIPO	AUTONOMÍA (km)	POTENCIA NOMINAL (kW/CV)	POTENCIA MÁXIMA (kW/CV)	VELOCIDAD MÁXIMA(Km/h)	CONSUMO (Wh/km)
Audi	A3 Sportback e-tron	PHEV	48		150/204	222	11
BMW I	I3 REX	REEV	170	75/102	125/170	150	115
BMW I	I3	BEV	190	75/102	125/170	150	129
BMW I	I8	PHEV	37	75/102	96/131	250	119
CHEVROLET	VOLT	REEV	83	111/151	111/151	160	130
CITROËN	C-ZERO Alrdream Seduction	BEV	150		49/67		
KIA	SOUL Eléctrico (*)	BEV	212		81/110	145	147
MERCEDES-BENZ	S500 Plug-in Hybrid	PHEV	33	305/415	330/449	250	135
MITSUBISHI	O-MIEV	BEV	150	49/67	49/67	130	132
MITSUBISHI	OUTLANDER (**)	PHEV	52	209/284	149/203	170	135
OPEL	AMPERA	REEV	83	111/151	111/151	160	130
PEUGEOT	ION	BEV	150		49/67		
PORSCHE	PANAMERA	PHEV	36		306/416	270	
RENAULT	ZOE	BEV	210	45/61	65/88	135	163
SMART	FORTWO Eletrive Drive	BEV	145		55/75		151
TAZZARI EV	EM1 ANNIVERSARY (***)	BEV	130	15/20	15/20	100	
VOLKSWAGEN	E-GOLF	BEV	190		85/116	140	127
VOLKSWAGEN	E-UP!	BEV	160		60/82	130	117
BYD	E6	BEV	300	60/82	90/122	140	205
NISSAN	LEAF	BEV	199		80/109	144	150
RENAULT	FLUENCE ZE	BEV	185	50/68	70/95	135	141
TOYOTA	PRIUS Plug-in Hybrid	PHEV	25	73/99	136/185	180	62

DATOS TÉCNICOS. BATERÍA							
MARCA	MODELO	TIPO	AUTONOMÍA (km)	TECNOLOGÍA	CAPACIDAD (Ah/kWh)	TENSIÓN (V)	GARANTÍA BATERIA (años)
Audi	A3 Sportback e-tron	PHEV	48	Li-ion	8,8	345	8
BMW I	I3 REX	REEV	170	Li-ion	21,6 kW/h	360	8
BMW I	I3	BEV	190	Li-ion	21,6 Kw/h	360	8
BMW I	I8	PHEV	37	Li-ion	7,1	355	8
CHEVROLET	VOLT	REEV	83	Li-ion	45	370	
CITROËN	C-ZERO Alrdream Seduction	BEV	150	li-ION	50	84	
KIA	SOUL Eléctrico (*)	BEV	212	li-ION	75/27	360	
MERCEDES-BENZ	S500 Plug-in Hybrid	PHEV	33	Li-ion	22/8,7	396	8
MITSUBISHI	O-MIEV	BEV	150	Li-ion	50	330	5
MITSUBISHI	OUTLANDER (**)	PHEV	52	Li-ion	3,34	300	5
OPEL	AMPERA	REEV	83	Li-ion	55/16	290	8
PEUGEOT	ION	BEV	150	Li-ion	-/14,5		
PORSCHE	PANAMERA	PHEV	36	Li-ion	24,5/9,4	384	6
RENAULT	ZOE	BEV	210	Li-ion	55/22	400	
SMART	FORTWO Eletrive Drive	BEV	145	Li-ion			10
TAZZARI EV	EM1 ANNIVERSARY (***)	BEV	130	li-ion (LiFePO4)	160	80	2
VOLKSWAGEN	E-GOLF	BEV	190	Li-ion	24,2	326	8
VOLKSWAGEN	E-UP!	BEV	160	Li-ion	18,7	374	8
BYD	E6	BEV	300	Fe Battery	220	312	5
NISSAN	LEAF	BEV	199	Li-ion laminada	66/24	360	5
RENAULT	FLUENCE ZE	BEV	185		65	360	
TOYOTA	PRIUS Plug-in Hybrid	PHEV	25	Li-ion	15	345,6	5

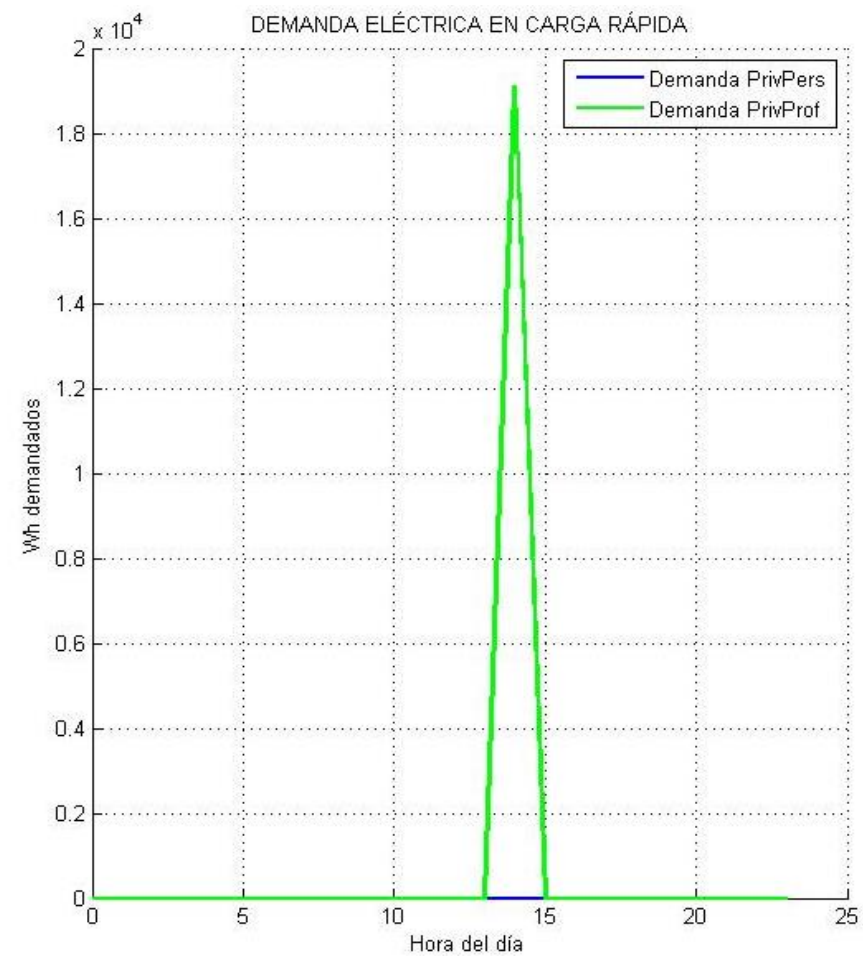
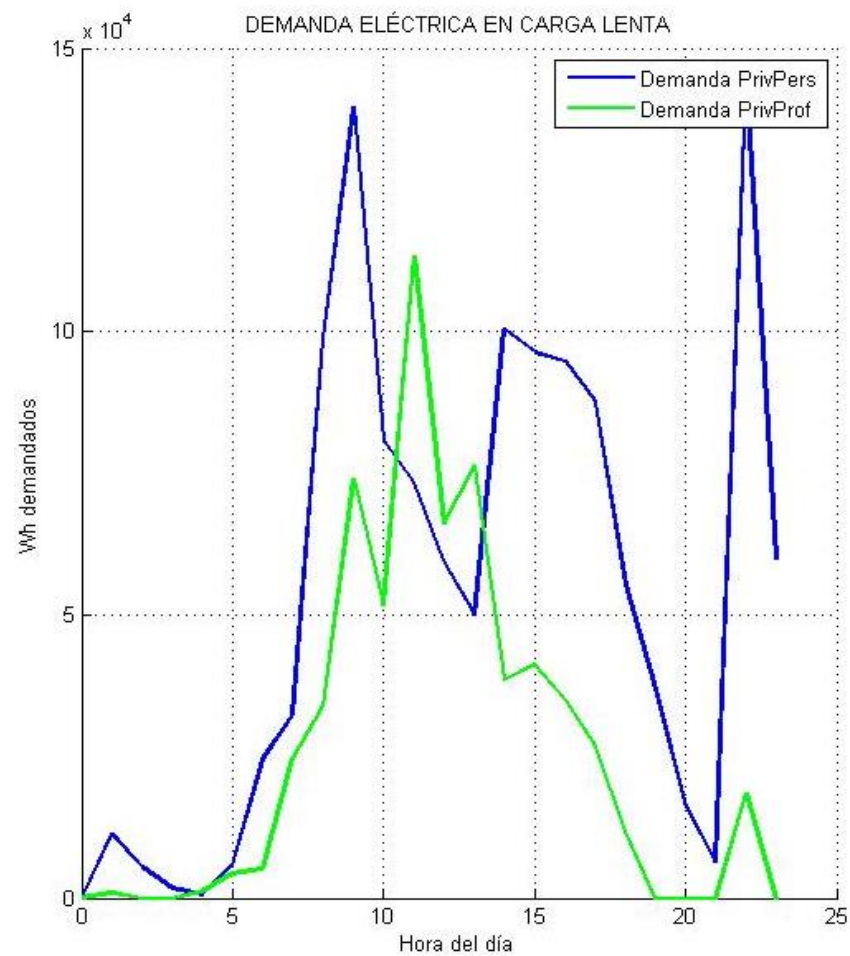
ANEXO III. CURVAS DE DEMANDA DE LAS DIFERENTES ESTRATEGÍAS DE CARGA

A continuación se aportan las gráficas ya introducidas al final del capítulo 4 pero en mayor tamaño, de forma que pueda apreciarse con exactitud las medidas, en kWh reportadas por los resultados de la simulación. Aparecen divididas en tres grupos, en función del caso de estudio de estrategia de demanda al que correspondan y siguiendo el orden de curva de demanda horaria en función del tipo de usuario, independientemente del modo de carga por el que se optó; curva de demanda horaria en función del modo de carga, independientemente del tipo de usuario que la realizó; y curva de demanda horaria para el conjunto global de la comunidad, independientemente del tipo de usuario y del modo de carga.

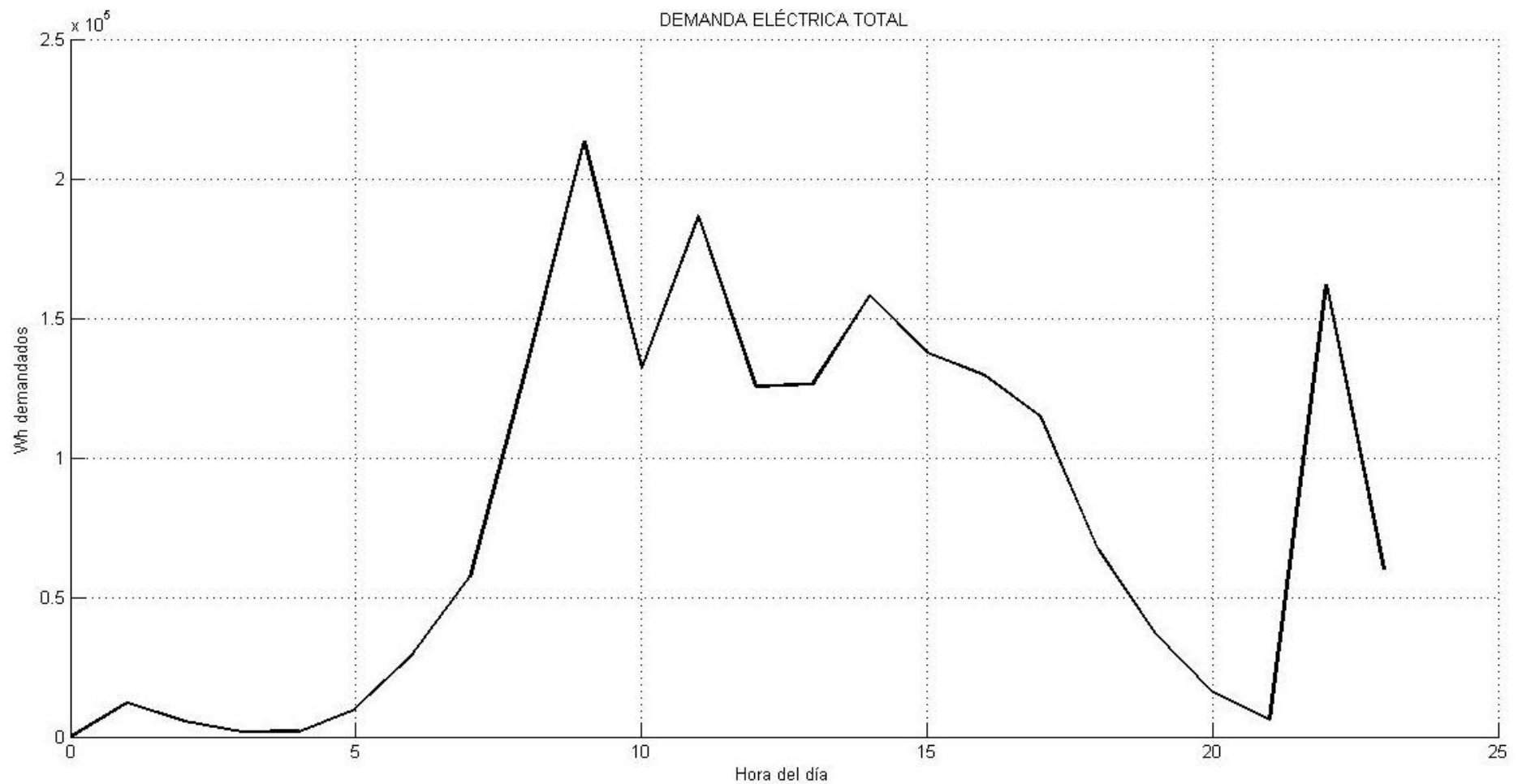
CASO 1: ESTRATEGIA DE CARGA CON CONTROL



1. CURVA DE DEMANA HORARIA EN FUNCIÓN DEL TIPO DE USUARIO. Resultados de simulación.

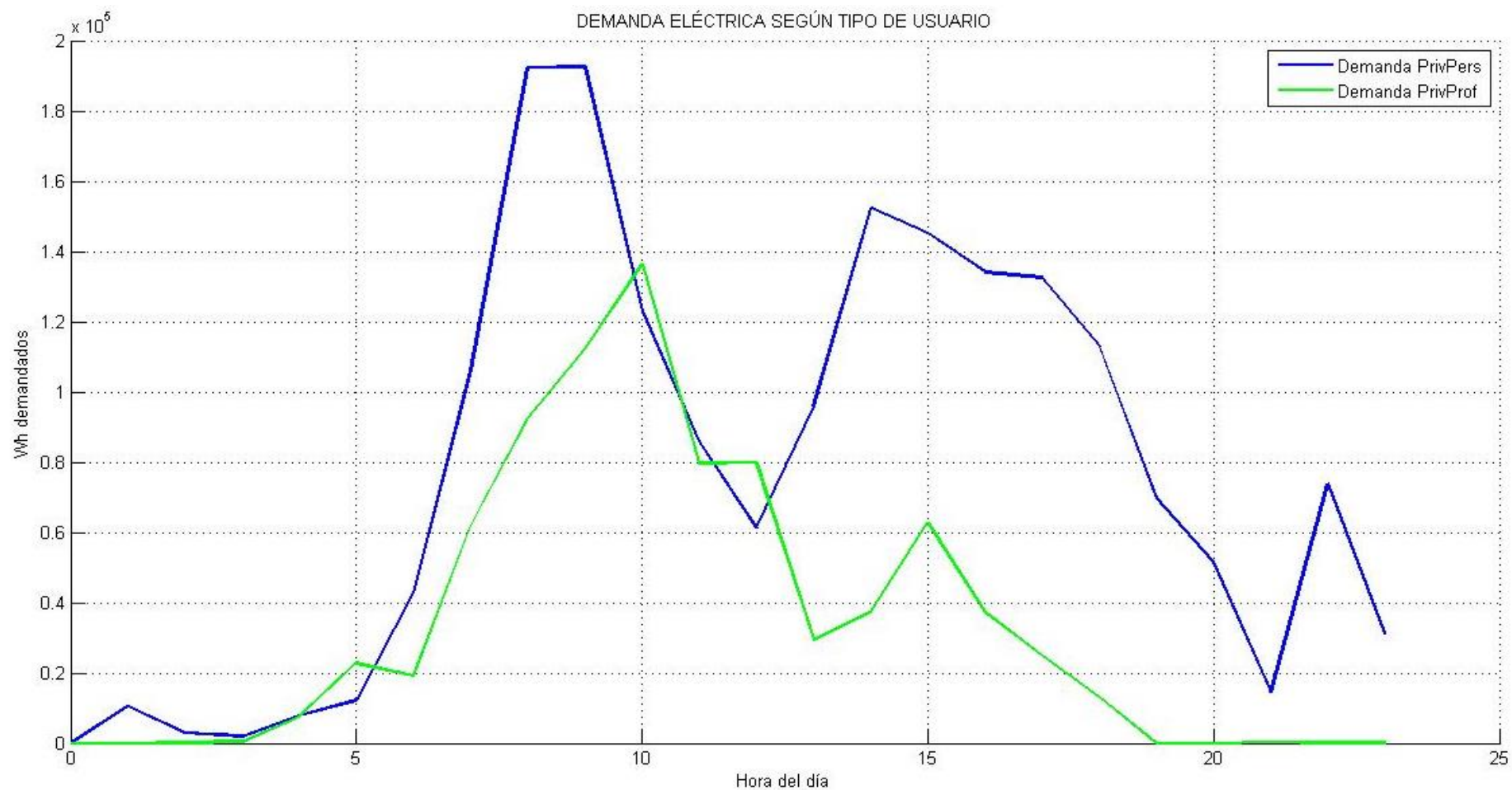


2. CURVA DE DEMANA HORARIA EN FUNCIÓN DEL MODO DE CARGA. Resultados de simulación.

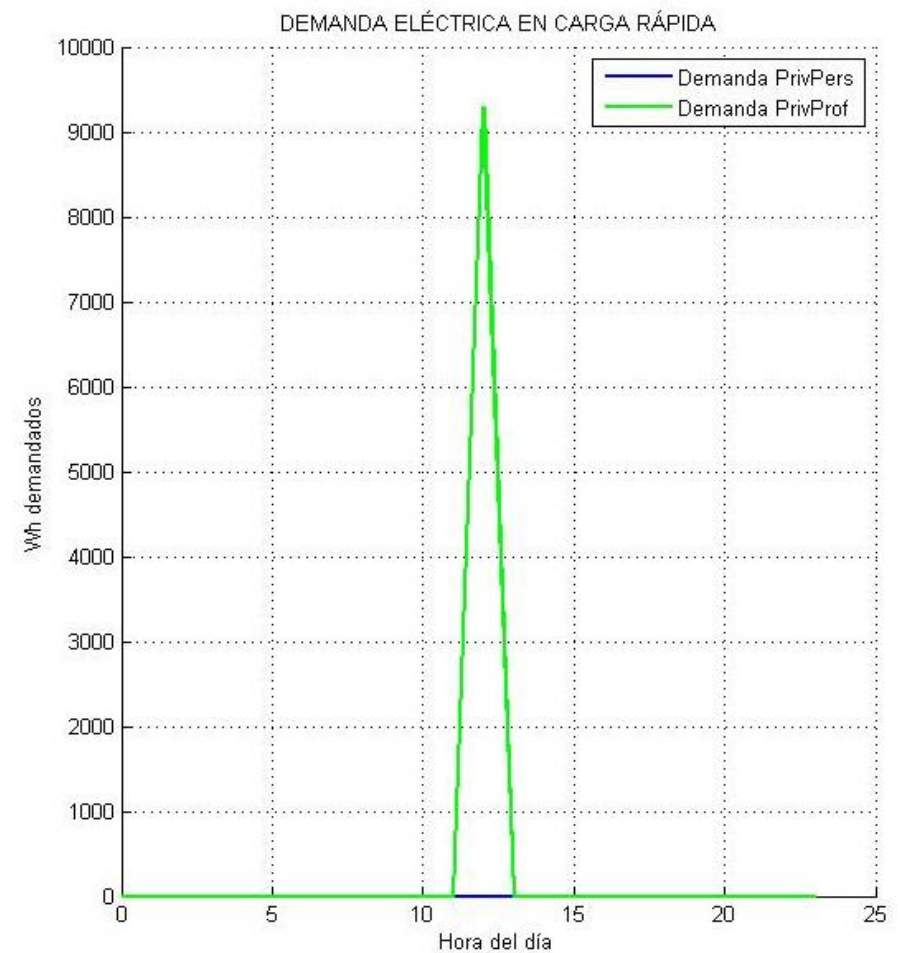
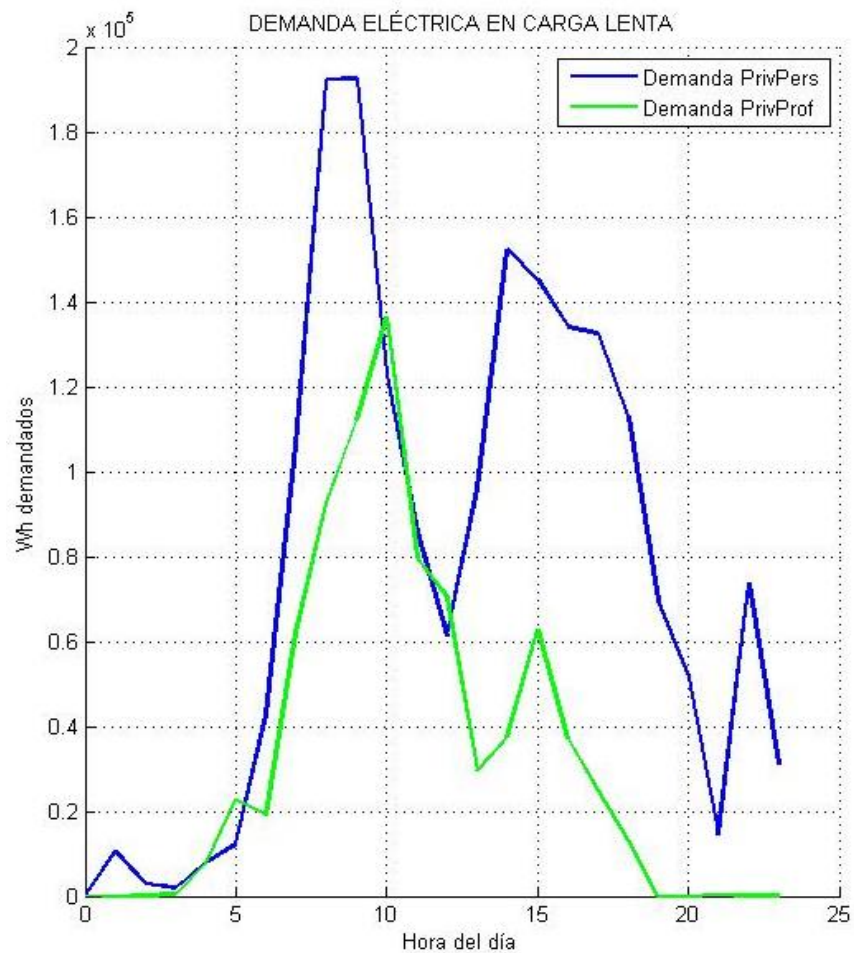


3. CURVA DE DEMANA HORARIA GLOBAL PARA TODOS LOS USUARIOS Y EN TODOS LOS MODOS. Resultados de simulación.

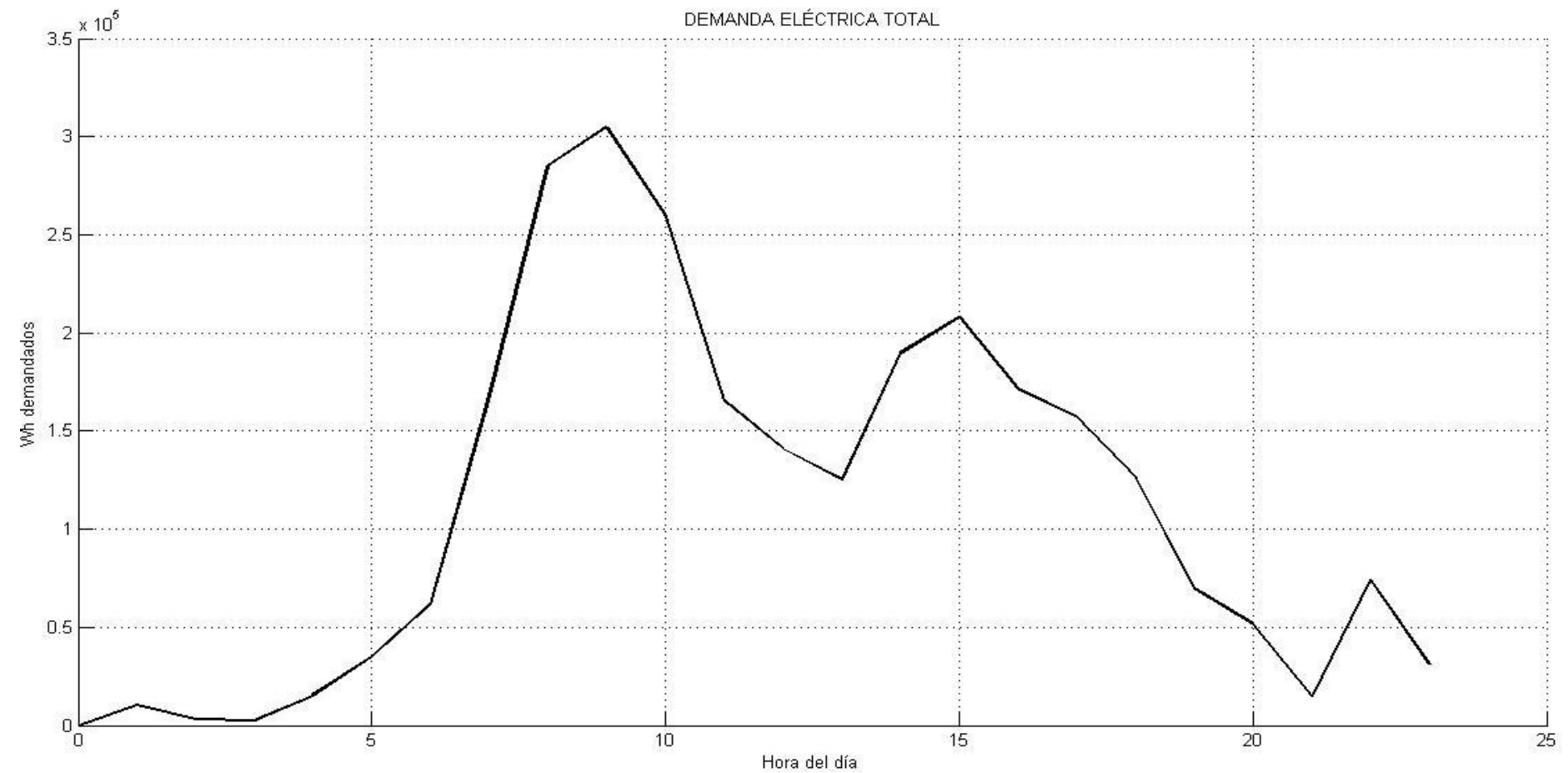
CASO 2: ESTRATEGIA DE CARGA SIN CONTROL



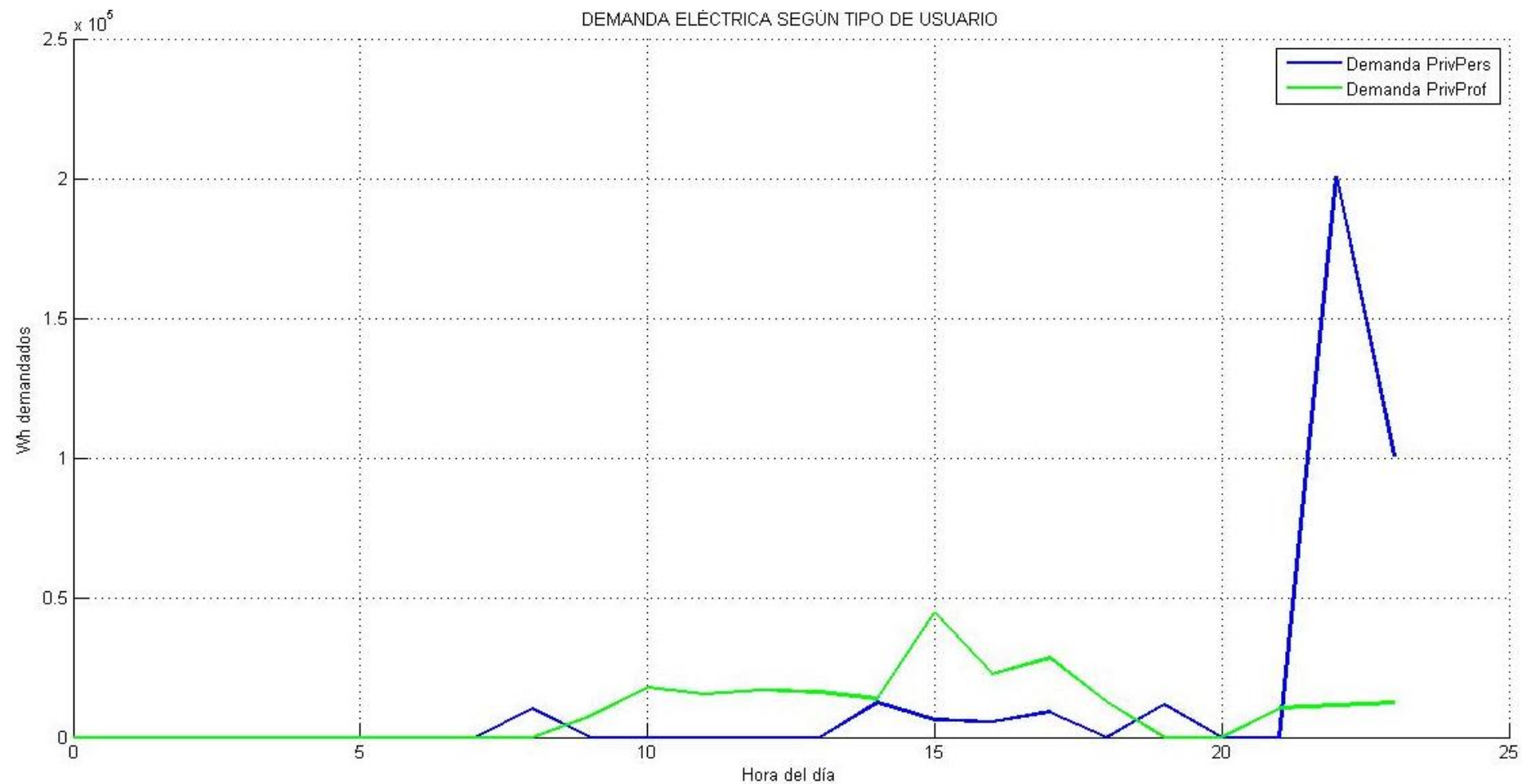
1. CURVA DE DEMANA HORARIA EN FUNCIÓN DEL TIPO DE USUARIO. Resultados de simulación



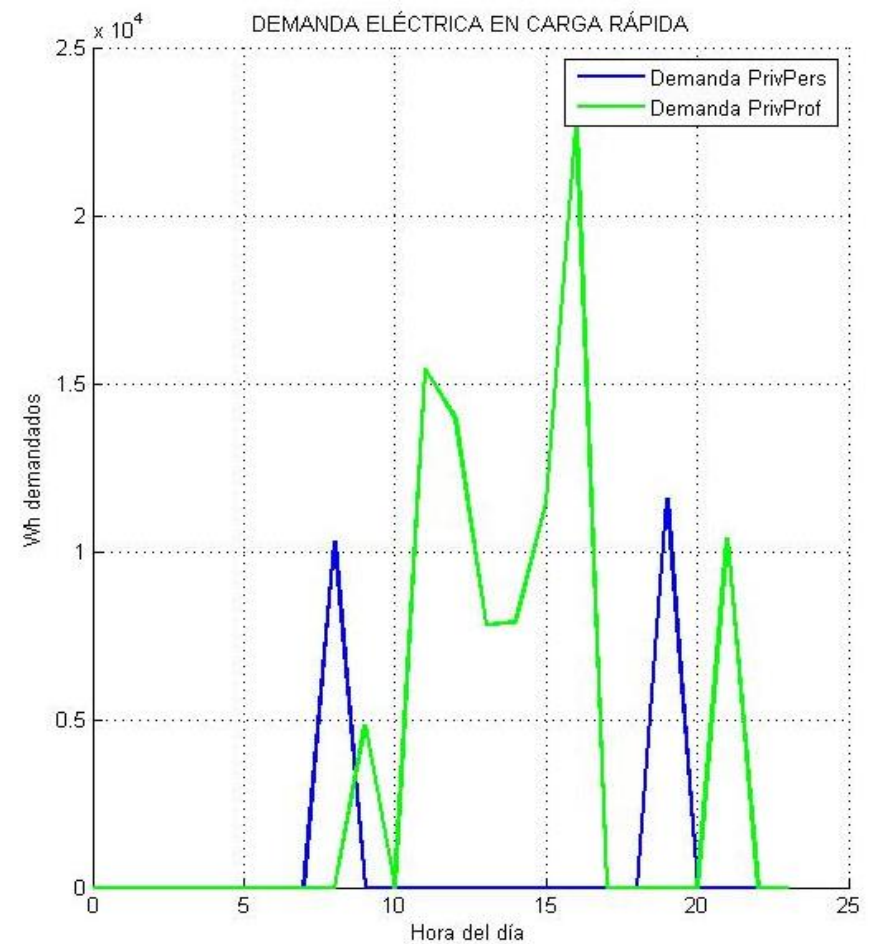
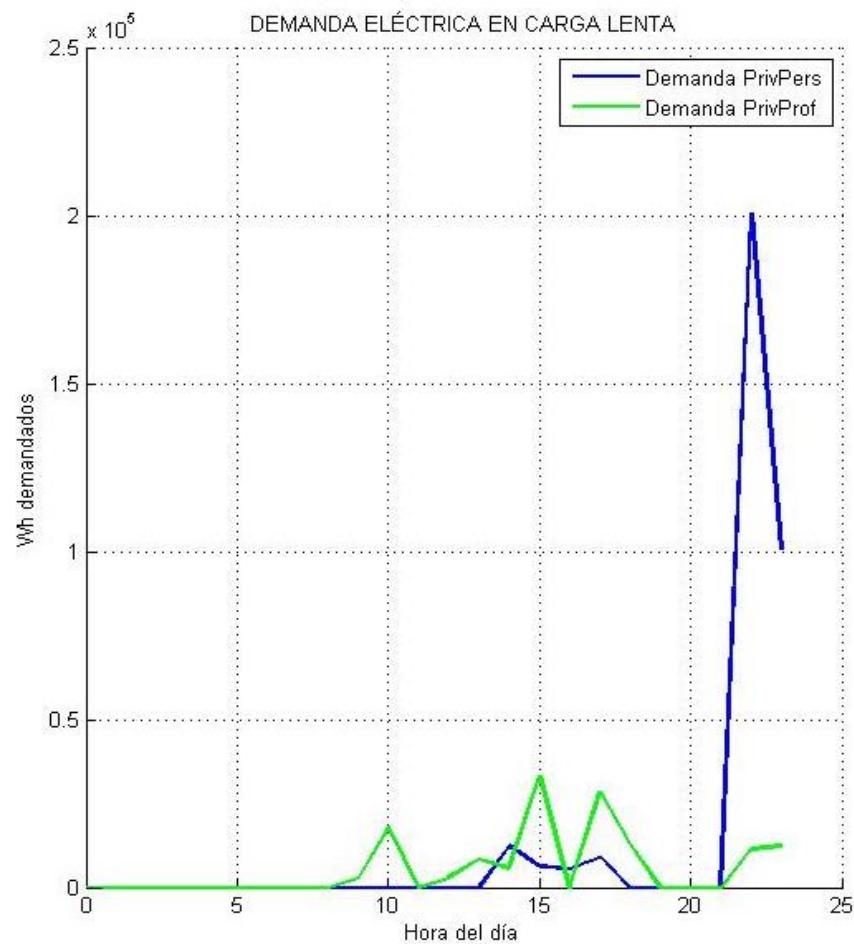
2. CURVA DE DEMANA HORARIA EN FUNCIÓN DEL MODO DE CARGA. Resultados de simulación.



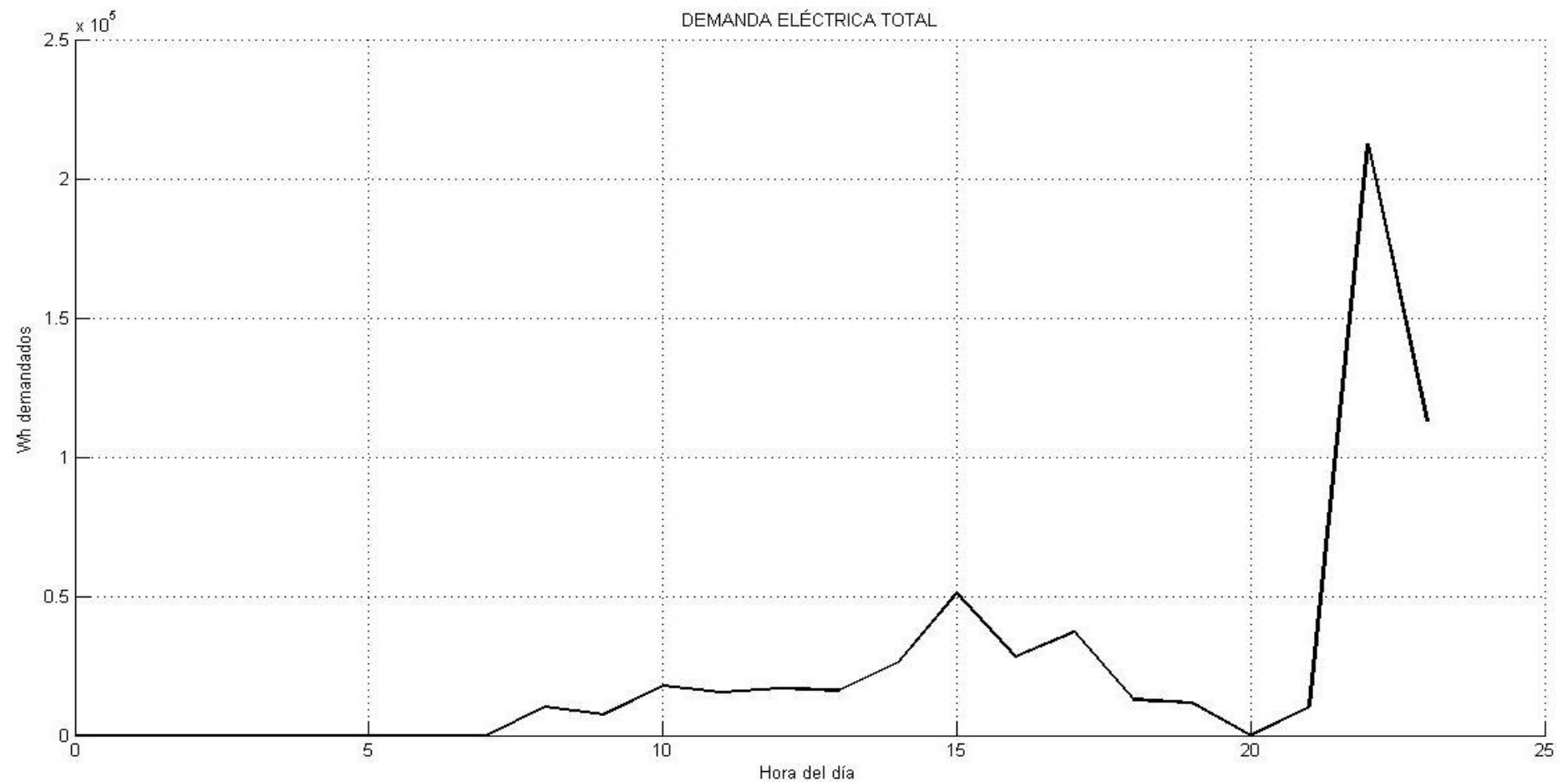
3. CURVA DE DEMANA HORARIA GLOBAL PARA TODOS LOS USUARIOS Y EN TODOS LOS MODOS. Resultados de simulación.

CASO 3: ESTRATEGIA DE CARGA CON CONTROL Y LIMITACIÓN DE CARGA

1. CURVA DE DEMANA HORARIA EN FUNCIÓN DEL TIPO DE USUARIO. Resultados de simulación.



2. CURVA DE DEMANA HORARIA EN FUNCIÓN DEL MODO DE CARGA. Resultados de simulación



3. CURVA DE DEMANA HORARIA GLOBAL PARA TODOS LOS USUARIOS Y EN TODOS LOS MODOS. Resultados de simulación.

ANEXO IV. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN VE

El objetivo perseguido con la elaboración del presente anexo es aportar una visión más detallada acerca de la tecnología actual de los dos pilares fundamentales encargados de la tracción y autonomía de los VEs. Lo aquí expuesto no es puramente necesario para la elaboración del modelo, objeto principal del trabajo, pero se considera interesante su conocimiento a modo de una mayor puesta en situación en el tema tratado. Por este motivo, se elaboran una breve descripción acerca de los motores eléctricos y de las baterías, enfocadas ambas a su aplicación en la tracción de los VEs.

1. EL MOTOR ELÉCTRICO

En un automóvil el motor constituye el corazón de la máquina, y es en este sentido que el motor eléctrico representa uno de los verdaderos pilares en la defensa de la electrificación del sector transporte. Es un sistema motriz capaz de dar par sin emitir ningún tipo de residuo durante su funcionamiento, ni material ni sonoro, y con una alta eficiencia energética¹⁸, posicionándose por ello como principal adversario del motor de combustión interna.

De todo motor obtenemos par y potencia, que se traducen en velocidad en las ruedas. Esta relación entre motor y ruedas en un motor de combustión cuenta con un intermediario, la caja de cambios, para adaptar las curvas par-velocidad y potencia-velocidad reales, las del motor, con las ideales requeridas para adquirir la velocidad deseada. En el caso del motor eléctrico, su curva característica es prácticamente la misma que la ideal, siendo prescindible el sistema de transmisión con cambio de marchas, sistema nada simple y que encarece los costes de fabricación y mantenimiento. Tan solo garantizando el funcionamiento del motor en una amplia gama de velocidades, factible gracias a la electrónica de potencia, este presentará un comportamiento muy similar al ideal de manera directa. A modo aclaratorio, en la Imagen 42 puede apreciarse, a la izquierda de la misma, el perfil ideal de la relación par-velocidad y potencia-velocidad de un motor eléctrico, que puede compararse con el perfil ideal de la

¹⁸ La eficiencia o el aprovechamiento energético viene determinado por el rendimiento, entendido como el cociente $\langle \text{Energía Obtenida} / \text{Energía Suministrada} \rangle$ y que cuantifica cuánta energía útil se saca de la energía total consumida.

relación par-velocidad de un motor de combustión presentado a la derecha de dicha imagen, logrado mediante la caja de cambios.

Además, los motores eléctricos cuentan con una elevada capacidad de sobrecarga lo cual supone una gran ventaja frente a los de combustión. La potencia máxima que es capaz de dar un motor de combustión es la potencia nominal del mismo, es decir, se ha de dimensionar el motor para las condiciones extremas de funcionamiento, aún a pesar de que estas se den en intervalos de tiempo muy cortos o cada muchísimo tiempo. Pues bien, esto no es así en un motor eléctrico el cual, durante breves periodos de tiempo, admite picos de potencia de hasta el doble de su valor de potencia nominal. Esto, en fase de diseño, se traduce en un dimensionado de motor para condiciones habituales de funcionamiento. Se concluye pues que, a iguales condiciones de funcionamiento, la potencia nominal del motor eléctrico necesaria será inferior que la del motor de combustión, y a menos potencia nominal menor coste.

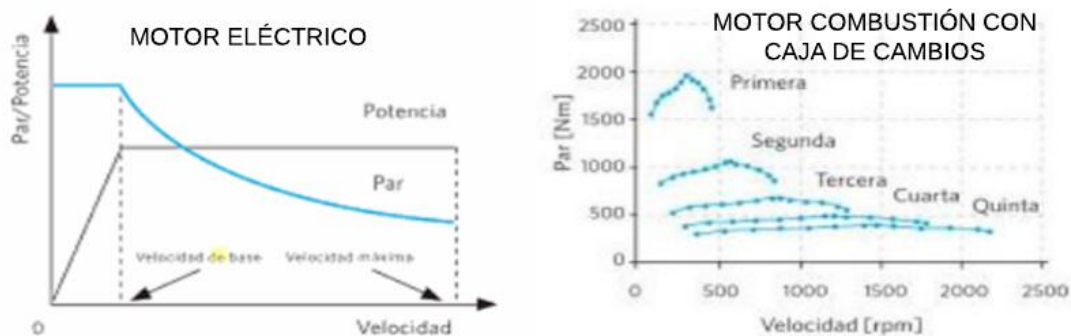


Imagen 42. Curva de funcionamiento ideal de un motor eléctrico (izquierda) y curva de funcionamiento de un motor de combustión con caja de cambios. [3].

Queda claro que el VE supone un cambio tecnológico de gran escala y si se quiere convencer a la sociedad de que acepte este cambio, se le ha de ofrecer claras mejoras con respecto a lo habido y facilitar la transición de una tecnología a otra, además de aportar las garantías suficientes que respalden el cambio y den la seguridad necesaria para acogerse a él. Siguiendo esta idea, a continuación se presenta un breve análisis de los requisitos que ha de cumplir un motor eléctrico para su aplicación en la tracción de VEs, mediante una comparativa de las distintas tecnologías existentes en este campo actualmente, que puede apreciarse en la Tabla 28. Atendiendo a las diferentes características y a los requisitos considerados óptimos para aplicación en de vehículos que cumple o no, se ha elaborado el esquema mostrado en la Imagen

43, que refleja los diferentes tipos de motores eléctricos más comunes en el mercado actual y su aplicación.

VALORACIÓN REQUISITOS PARA PROPULSIÓN DE VEHÍCULO	MOTOR DC	MOTOR SÍNCRONO	MOTOR ASÍNCRONO	MOTOR RELUCTANCIA CONMUTADA
Altas densidades energética y de potencia	↑	↑↑	↓↓	↑
Alta eficiencia	↓	↑↑	↑	↑
Bajos niveles de vibraciones y ruidos	-	↑	↑	↓↓
Bajas fluctuaciones de par	↑	↑↑	-	↓↓
Sencillez de control	↑	↑↑	-	↑↑
Elevada robustez mecánica y térmica	↓	↑	↑↑	↑↑
Sencillez de mantenimiento y fabricación	↓↓	↑	↑↑	↑↑
Bajo coste	↓↓	↓↓	↑	↑↑
Amplia gama de velocidades	↑	↓↓	↑	↑↑
Elevada capacidad de sobrecarga	↑	↑	-	↓↓

Tabla 28. Comparativa de los distintos motores eléctricos en función de los requisitos que han de cumplir para su aplicación en la tracción de VE.

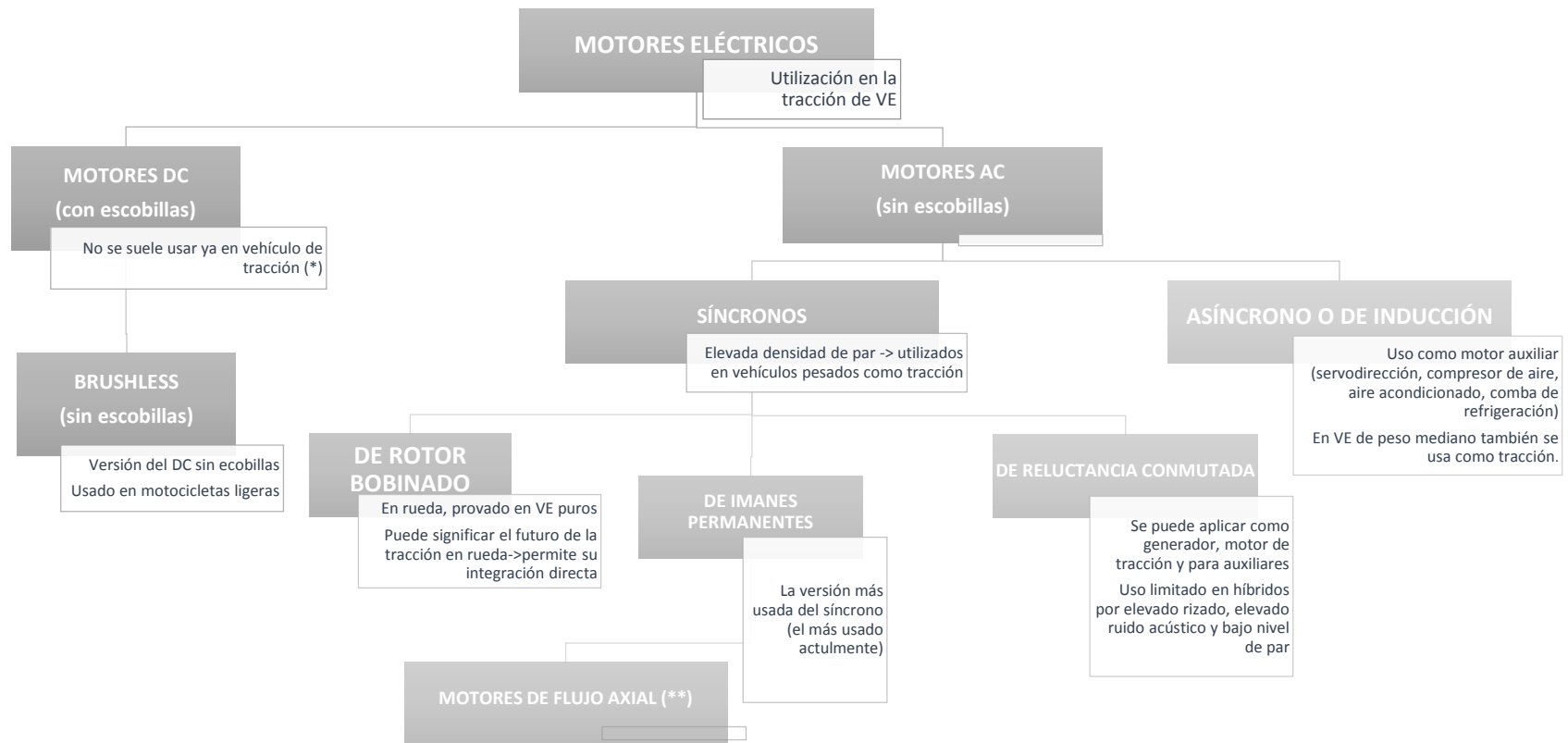


Imagen 43. Tipos de motores eléctricos presentes en el mercado actual y su aplicación.

(*) Los motores con escobillas presentan ciertos inconvenientes en cuanto a mantenimiento y fiabilidad, por el desgaste de las mismas principalmente. Esto los hace poco aptos para la tracción de VE.

(**) El motor de flujo axial representa una nueva tecnología en el campo de los motores que a diferencia de los otros aquí analizados, basados en un flujo magnético radial que mueve el rotor, se basa en el cerrado de los circuitos magnéticos en dirección axial de manera que el devanado inductor crea un campo magnético paralelo al eje de giro del rotor. La arquitectura de estos motores consta de tres discos, dos de los cuales desempeñan la función de semiestatores activos magnéticamente y entre los cuales gira el tercer disco, que hace las veces de rotor. La forma del disco permite que se generen grandes flujos con un rotor de volumen pequeño, es decir, permiten una reducción del tamaño de los motores. Están pensados básicamente para ser integrados en las ruedas del vehículo, liberando un amplio espacio en el interior del mismo que pueda ser ocupado por las baterías y permitiendo también una mejor distribución de las mismas y con ello del peso del vehículo. Michelin.

2. LA BATERÍA

Las baterías constituyen uno de los elementos de mayor importancia en un VE y al mismo tiempo uno de los más problemáticos, causante de quizá los dos mayores inconvenientes conocidos de tales vehículos: la autonomía y el precio de mercado. Aunque existen excepciones, como es el caso de los Tesla, la autonomía que a día de hoy ofrecen los VE comercializados ronda los 200km, lo cual es más que suficiente para un entorno urbano¹⁹ pero no da la confianza necesaria a los usuarios de cara a largos desplazamiento, al no ser solo este el problema sino también el tiempo y la infraestructura de recarga. Si a esto se le suma el elevado precio, con prestaciones equiparables respecto a su competidor más directo: el VCI, se hace patente su desventaja en el mercado. Parece claro pues que para terminar de impulsar el VE, uno de los principales componentes a desarrollar es la batería. A continuación se presenta una breve descripción del estado actual de esta tecnología, sin pretender profundizar en exceso en el tema, ya que se sale del alcance de este trabajo, pero sí a modo introductorio y para identificar qué parámetros afectan en mayor medida al consumo del vehículo, lo cual sí influye en el objeto de este trabajo.

Se entiende por batería aquel dispositivo que, mediante la unión de varios elementos o celdas, logra suministrar electricidad a partir de la energía química originada en las reacciones de oxidación y reducción que tienen lugar en su interior. Aún a pesar de su recargabilidad, toda batería tiene un cierto límite de ciclos de carga, lo que supone una limitación más y muy a tener en cuenta: la vida útil, que depende fundamentalmente de su tecnología.

Existen diversos tipos de batería que se pueden clasificar fundamentalmente en función del material con el que se fabriquen y de su tecnología, entre las comercializadas más comúnmente destacan:

- Las de *Plomo-ácido*, las más utilizadas en el pasado en VE y a día de hoy en VCI, en el sistema eléctrico y en la asistencia del arranque del motor. Fueron inventadas en 1859 y su tecnología consiste en la utilización de ácido sulfúrico a modo de electrolito y plomo a modo de electrodos. Son de bajo coste pero de baja eficiencia y alta toxicidad
- Las de *Níquel-Cadmio*, una tecnología también altamente probada, que presentan como gran ventaja su larga vida útil. Utilizan en cada celda un electrolito de hidróxido de

¹⁹ Según datos estadísticos objetivos, el 80% de los desplazamientos en entorno urbano son de unos 50 km.

Níquel disuelto y electrodos de Cadmio a modo de ánodo y de hidróxido de Níquel a modo de cátodo. En su contra juega el alto poder contaminante del Cadmio.

- Las de *Níquel-Hidruro metálico (Ni-MH)*, consideradas sucesoras directas de las anteriores al sustituir el Cadmio por una aleación metálica menos contaminante y que permite ganar un 30% de energía. En su contra juega su alto nivel de descarga, su baja eficiencia y su mal funcionamiento a bajas temperaturas. Han sido utilizadas en diversos modelos de híbridos altamente comercializados como es el caso del Toyota Prius, no así en VE puros debido a su baja autonomía.
- Las *Zebra (Zeolite Battery Research Africa Project)* son una alternativa realmente factible y han sido probadas en numerosos prototipos de VE. Aun así, cuentan con una gran desventaja de carácter térmico, han de ser calentadas para su uso al funcionar a unos 250°C, necesitando de un sistemas de control de temperatura que eleva su tamaño y supone un consumo adicional de calefacción.
- Las de *Zinc-Aire*, de tecnología muy diferente a las anteriores, al no ser recargables eléctricamente. Se basan en la utilización de Zinc como electrodo negativo y un catalizador junto con un material poroso como electrodo positivo, que han de ser cambiados para recargar la batería (“recarga mecánica”), imposibilitando su uso en sistemas de recuperación de energía. Su punto a favor es la gran reducción en peso al utilizar oxígeno como componente y su capacidad de almacenaje de hasta tres veces mayor.
- Las de *ión-Litio*, las dominadoras más recientes del desarrollo de VE y ampliamente conocidas por su utilización en electrónica portátil. Su tecnología implica un ánodo de grafito y un cátodo de Óxido de Litio-Cobalto con una mezcla de disolventes orgánicos, entre los que destaca una sal de Litio, a modo de electrolito. A su favor juega su ligereza, su capacidad de carga y su mayor duración. Cuentan con un circuito electrónico que limita los niveles de carga y descarga de sus celdas. Por contra presentan unos ciclos de vida cortos y una significativa degradación con los años, junto con su elevada sensibilidad ante temperaturas extremas que hace que su capacidad disminuya de manera clara. Los modelos de VE, tanto híbrido como puro, que se están presentando desde 2011 cuenta mayoritariamente con esta tecnología de batería, especialmente con arquitectura laminar de celdas que, según los fabricantes, es la más segura.

Independientemente de la tecnología utilizada, en toda batería dos aspectos clave son la tensión, que viene fijada por el potencial de reducción del par redox utilizado y que suele estar entre 1 y 4 V por celda, y la potencia²⁰, entendida como la capacidad de la batería de absorber o ceder energía en un tiempo determinado [Wh]. Focalizando la atención en las baterías de tracción²¹, dicho parámetro resulta esencial al representar la cantidad de energía almacenada de la que va a depender la autonomía del VE. Especialmente interesante es valorarlo en función del peso, como potencia específica o densidad energética por peso [Wh/kg], y/o del volumen, como densidad de potencia o densidad energética por volumen [Wh/l], a modo de evaluación de las prestaciones de la batería. A mayor densidad en peso y/o volumen mayores prestaciones de la batería, obvio si se tiene en cuenta que en una batería pensada para un VE se busca, en esencia, la maximización del almacenamiento energético minimizando peso y volumen, dos aspectos clave en el diseño de todo vehículo. También se ha de evaluar la capacidad, o carga total almacenada. Pero no solo la autonomía del VE marca la decisión acerca de la batería a seleccionar, también son aspectos muy valorados la fiabilidad y la vida útil de la batería, es decir, el comportamiento que presenten las baterías ante solicitudes propias del VE y el número de ciclos que sea capaz de aguantar. No se ha de olvidar tampoco que lo que se tiene en una batería es una concentración de energía y, como tal, lleva asociados una serie de riesgos que hacen de la seguridad otro aspecto a tener en cuenta en su aplicación a VE. Por último, se ha de atender también al coste económico que lleve asociado la batería, ya que repercutirá mucho en el coste final de VE y este ha de ser competitivo frente al coste del VCI.

A continuación se presenta la Tabla 29 con una comparativa entre las tecnologías de batería actualmente más usadas en función algunas de las características más importantes a la hora de diseñar, seleccionar y optimizar las mismas para su aplicación en VE.

²⁰ En el caso particular de la energía eléctrica se puede dar cierta confusión entre los términos energía y potencia. Energía es la capacidad de llevar a cabo un trabajo, por ello la unidad de medida del trabajo y la energía es la misma, el Julio [J] según el Sistema Internacional. Por su parte, la potencia es la cantidad de trabajo realizado en la unidad de tiempo y se mide en Watios [W]. Ahora bien en el caso de las instalaciones eléctricas, se utiliza el kWh para medir la energía producida o consumida por un aparato eléctrico y el kW como medida de la potencia de dicho aparato, conviene no confundirlas.

²¹ Se entiende por batería de tracción a aquella encargada de la impulsión de un vehículo híbrido eléctrico o un vehículo eléctrico puro de batería.

COMPARATIVA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE BATERÍAS	Pb-Ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ión
Densidad energética por peso [Wh/kg]	30-40	48-80	60-120	110-160
Tensión por celda [V]	2	1,25	1,25	3,16
Duración [Nº de ciclos]	1000	500	1000	4000
Tiempo de recarga [horas]	8-16	10-14	2-4	2-4
Autodescarga [%]	5	30	20	25
Seguridad	Regular	Bien	Bien	Regular

Tabla 29. Comparativa entre tecnologías de batería actualmente más usadas en función de los requisitos para su aplicación a la tecnología de VE.

Por otra parte, en la Imagen 44 se aprecian la energía específica [W/kg] y la potencia específica [Wh/kg] para diferentes tipos de baterías, pudiéndose comprobar la clara ventaja que presenta la tecnología de Li-ion frente a las demás en cuanto a optimización, tanto en lo referente a energía como a potencia.

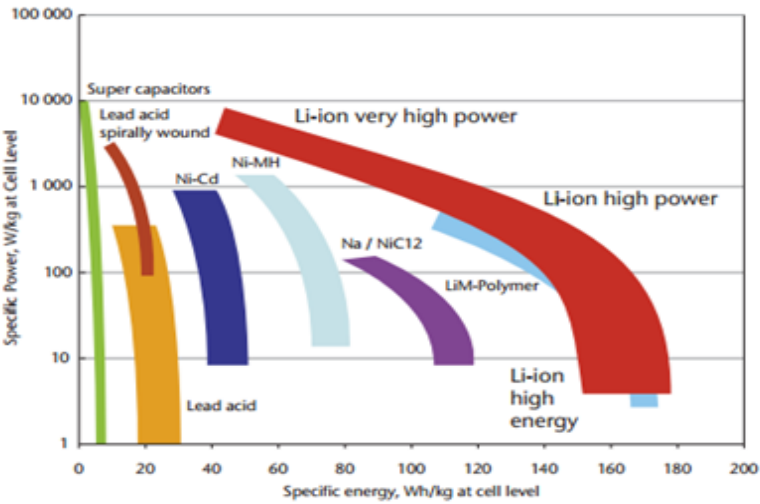


Imagen 44. Energía específica [Wh/kg] frente a potencia específica [W/kg] para diferentes tecnologías de batería. Technology Roadmap. IEA [34].

Como puede apreciarse en la Tabla 29 y en la Imagen 44 junto con todo lo expuesto anteriormente, se concluye que las baterías de lón-litio son las actuales baterías por excelencia para VEs, al presentar, en cómputo global, las mejores prestaciones. Los modelos de VE utilizados en este proyecto harán uso todos ellos de esta tecnología de batería.

Otro componente importante para las baterías de los VE es el BMS (Battery Management System), un sistema que permite el control de la temperatura, la tensión y los límites de tensión y corriente que ceden o absorben las baterías. Este control de carga permite que esta se lleve a cabo de forma óptima, asegurando que todas las celdas conectadas en serie que componen la batería se recarguen de forma equilibrada. Para ello, el BMS identifica aquellas celdas con menor nivel de carga y les da prioridad [72].

Uno de los objetivos que se persigue con la fomentación de la electrificación del transporte es la reducción de la contaminación. En este sentido, hay que tener en cuenta que las baterías son unos elementos altamente contaminantes si no se tratan de la manera adecuada. Como en todo caso que así lo permita, las baterías de los VE serán reutilizadas antes de ser recicladas. Por ejemplo, a modo de banco de baterías en instalaciones de microgeneración a través de ER o en viviendas aisladas de la red, al ser las exigencias de rendimiento de esos fines menores. Una vez que no sean válidas como acumuladores, se las someterá a un proceso de reciclado y tratamiento de residuos en instalaciones adecuadas para tal fin.

OTRAS ALTERNATIVAS DE ALMACENAMIENTO ELÉCTRICO

Una potente alternativa a las baterías la conforman los supercondensadores, dispositivos capaces de almacenar energía electroquímica basándose en el proceso físico de almacenamiento de carga en su superficie. Presentan una potencia específica mucho más elevada que la de las baterías pero cuentan con una menor densidad de energía.

Otra opción altamente atractiva es la de utilizar una tecnología combinada de baterías, encargadas del funcionamiento en marcha constante del vehículo gracias a su mayor capacidad de almacenar energía, y de supercondensadores, a cargo de los cuales correrían los arranques y los aportes extra de energía en cortos periodos de tiempo como pueden ser subidas de pendientes pronunciadas.

Sea cual sea la tecnología finalmente usada y aunque se consiga mejorar enormemente en este sentido, algo que siempre va a estar ahí, al menos en un futuro próximo, en este nuevo tipo de movilidad es el tema de la autonomía y la recarga. Ya no solo como un problema de no llegar al destino deseado sino como un medio de concienciación acerca del consumo. Es por ello que la implementación del VE no requiere solo de un cambio tecnológico sino también de nuevos hábitos de consumo y movilidad. En este sentido sería muy importante una concienciación por parte de los usuarios en temas como el reciclaje de baterías y los hábitos de carga. En esto último, se habría de recurrir a aquellas recargas que afecten menos a la estabilidad del sistema, tales como la recarga lenta en horas valle, que contribuyan al aplanamiento de la curva de demanda. Por supuesto a esto se le suma un pequeño cambio en la mentalidad del conductor de manera que esta resulte más favorable para los sistemas de recuperación de energía en frenadas. Para ello es interesante conocer que una frenada consta de, por así decirlo, dos fases. La primera de ellas corre a cargo del motor, aprovechando la ventaja que este ofrece al posibilitar funcionamiento como generador. La segunda es en la que interviene los frenos mecánicos. Pues bien, sólo sería aprovechable la energía de la primera fase y de ahí la importancia de la manera de conducir de los usuarios.

ANEXO V. EL SECTOR ELECTRICO Y LA ENERGÍA ELÉCTRICA

1. EL SECTOR ELÉCTRICO

El sector Eléctrico [73, 74] es el conjunto de empresas y organismos que hacen posible la disponibilidad de electricidad en todo momento y en casi cualquier lugar. Su columna vertebral la conforman las Compañías Eléctricas, que representan una parte muy importante de la industria española, y lo completan los organismos reguladores específicos del sector, a saber en el caso de España: el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, que gestiona el mercado mayorista de electricidad en el que todas las empresas generadoras están obligadas a ofertar su producción; la Comisión Nacional de la Energía (CNE), encargada de la coordinación técnica que asegure la coincidencia en todo momento entre producción y demanda; el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y los Operadores del Mercado del Sistema. En España este sector ha sufrido una profunda transformación desde la aprobación de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, momento hasta el cual la actividad del mismo estaba concentrada en empresas que ejercían monopolio en las distintas regiones españolas. Con esta ley se inició el proceso de liberalización progresiva del sector, al abrirse las redes a terceros y establecerse un mercado organizado de negociación de la energía. La norma básica que en la actualidad regula la estructura y el funcionamiento del sector es la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico. En los dieciséis años transcurridos entre una y otra se han producido cambios fundamentales en el sector eléctrico que han hecho necesario el establecimiento de este nuevo marco normativo, como son la elevada penetración de las ER, la aparición de nuevos agentes y la mayor complejidad de las ofertas en el mercado, a lo que se suma el exceso de capacidad para asegurar el respaldo del sistema y el déficit estructural. Con esta ley se aporta una estabilidad regulatoria en el sector que permite garantizar la sostenibilidad del sistema a largo plazo así como la resolución de las posibles deficiencias existentes en el funcionamiento del mismo, para lo cual se estableció un único transportista y operador del sistema eléctrico español, Red Eléctrica de España (REE). Esto supone la liberalización de la actividad de generación y abre a los productores de electricidad las puertas del mercado mayorista pudiendo realizar ofertas en el mismo así como a través de contratos bilaterales, dejando en manos de los consumidores la decisión de comprar la energía al productor que más les interese.

Se entiende por suministro de energía eléctrica al abastecimiento de tal energía a través de las redes de transporte y distribución a cambio de una contraprestación económica, previamente acordada. Las actividades relativas al suministro de energía eléctrica son: generación, transporte, distribución, servicios de recarga energética, comercialización e intercambios intracomunitarios e internacionales, junto con la gestión económica y técnica del sistema.

1.1 LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

La generación de electricidad es el proceso de conversión de una energía primaria en electricidad, para lo cual prácticamente la totalidad de tecnologías se basan en el uso del alternador. Como ya se ha comentado, las energías primarias y los procesos para la obtención de electricidad son muy variados, a continuación se incluye un cuadro resumen de las principales centrales eléctricas y su funcionamiento. Se incluye en la Imagen 45 un esquema-resumen de las actuales formas de obtención de energía eléctrica y su tecnología.

1.2 LAS REDES ELÉCTRICAS

Se entiende por red eléctrica el conjunto de líneas, transformadores e infraestructura que mantienen interconectados centros de producción y de consumo de electricidad entre sí en todo el sistema eléctrico. La operación y gestión de la red eléctrica es una labor fundamental para garantizar un suministro seguro, continuo y de calidad. Esto corre a cargo de dos agentes: el Operador del Sistema de Transporte (TSO, Transmission System Operator) y el Operador del Sistema de Distribución (DSO, Distribution System Operator).

La actividad de transporte consiste en la conducción de la electricidad desde los centros de producción hasta las redes de distribución, lo cual se lleva a cabo en alta tensión (AT) a 400kV y 220kV, con el objetivo de reducir las pérdidas en la medida de lo posible. Por su parte, la actividad de distribución comprende desde las subestaciones de AT hasta los puntos de consumo, por remotos que estos sean. En las redes de distribución se opera en tres niveles de tensión diferentes: Alta Tensión (AT), Media Tensión (MT) y Baja Tensión (BT). Al último tramo, el que lleva la electricidad desde los centros de transformación hasta las instalaciones del usuario final, se le conoce como red de enlace y permite la interconexión y protección de las instalaciones.

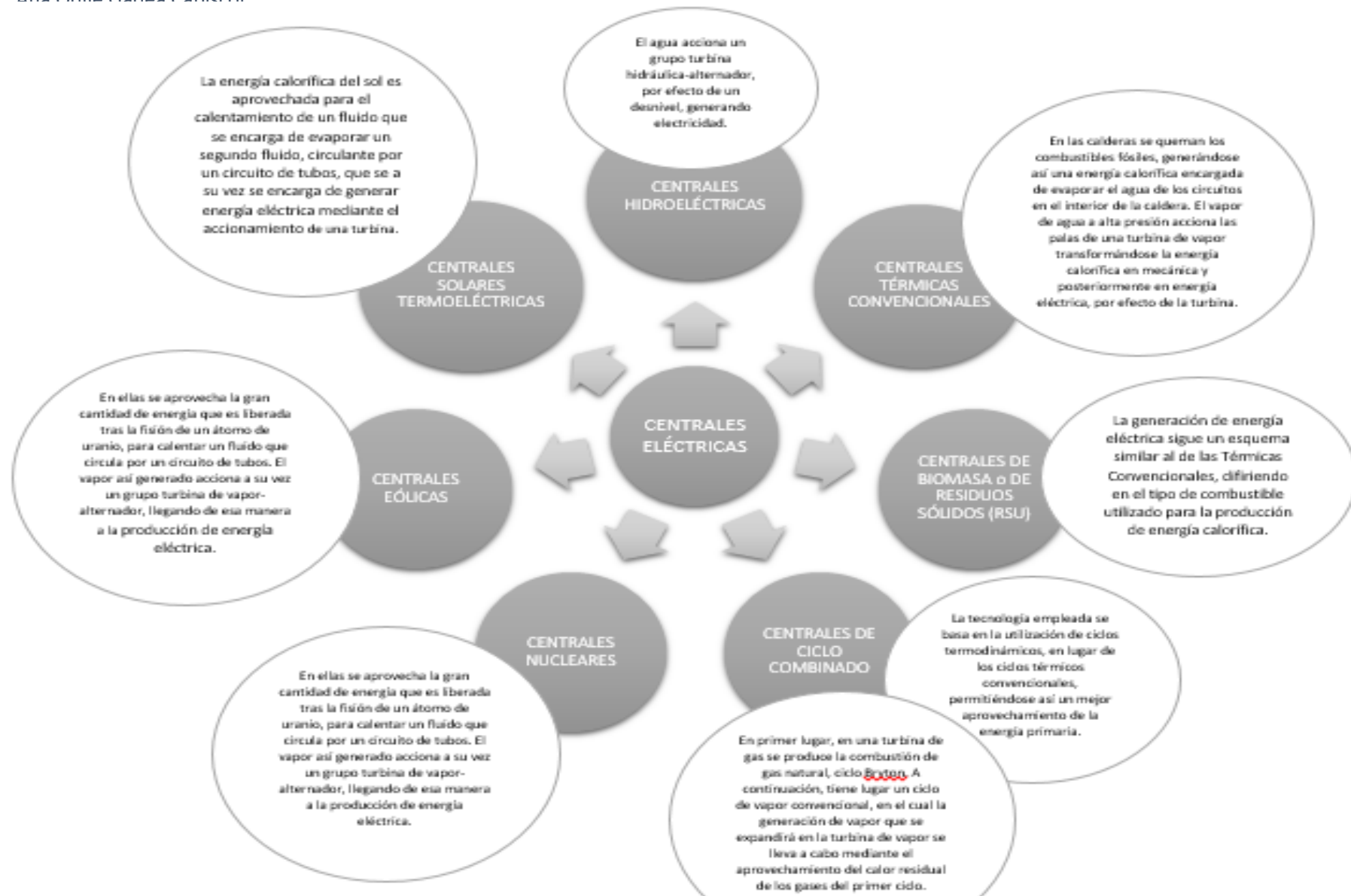


Imagen 45. Centrales de generación de energía eléctrica.

En el caso español, Red Eléctrica de España (REE) [75] se ocupa del transporte y la operación del sistema eléctrico, tanto en la península como en los archipiélagos de Baleares y Canarias, garantizando en todo momento la seguridad y continuidad del suministro así como la correcta coordinación entre producción y transporte, llevando la energía hasta las redes de distribución con las condiciones de calidad exigibles según la normativa vigente. Además, REE gestiona los servicios de ajuste para adecuar los programas de producción resultantes de los mercados eléctricos diarios e intradiarios a los requisitos de calidad, fiabilidad y seguridad del sistema eléctrico. También elabora anualmente las previsiones de evolución de la demanda eléctrica a medio y largo plazo, que son fundamentales para la elaboración de planes de desarrollo futuro de la red de transporte, aprobados por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

La red de transporte está compuesta por más de 42.000 kilómetros de alta tensión, más de 5.000 posiciones de subestaciones y más de 80.000 MVA de capacidad de transformación, configurándose en una red mallada: fiable, segura y robusta.

Diariamente se elaboran previsiones de curva de demanda con los valores de consumo en periodos precedentes similares, pero el consumo es muy variable y se ve afectado por muchos factores diferentes como son la laboralidad, la climatología y la actividad económica. A fin de que los valores previstos se ajusten lo más posible a lo que será la realidad, se elaboran correcciones de los datos de los que se dispone, mediante una serie de factores que tienen en cuenta estos rasgos. Dicha previsión se va actualizando en función de las necesidades que se producen en tiempo real, elaborándose una curva de demanda real que refleja el valor instantáneo de demanda eléctrica. Además, se lleva a cabo una programación horaria operativa, es decir, se tiene una producción programada para los grupos de generación a los que les sea adjudicado el suministro de energía en la casación de los mercados diarios, los mercados de gestión de desvíos y la regulación terciaria. A pesar de la variabilidad que sufre el consumo debido a muy diversos factores, todas las curvas de demanda guardan unos rasgos comunes, presentan unos picos en las horas cercanas al mediodía y la tarde y unos valles en el intermedio y la noche. La mejora de la eficiencia del sistema eléctrico pasa precisamente por el aplanamiento de dicha curva, desplazando la demanda de electricidad a las horas de menor consumo y es precisamente el VE una vía para lograr esto, gracias a la recarga lenta nocturna. En la Imagen 46 puede apreciarse una curva de demanda proporcionada por REE donde se distinguen las tres curvas descritas arriba y se presenta información de las distintas tecnologías

de producción y componentes de generación necesarios para cubrir la demanda. También se muestran las emisiones de CO₂ asociadas al parque de generación peninsular español, que representan en torno al 28% de las emisiones totales [75].

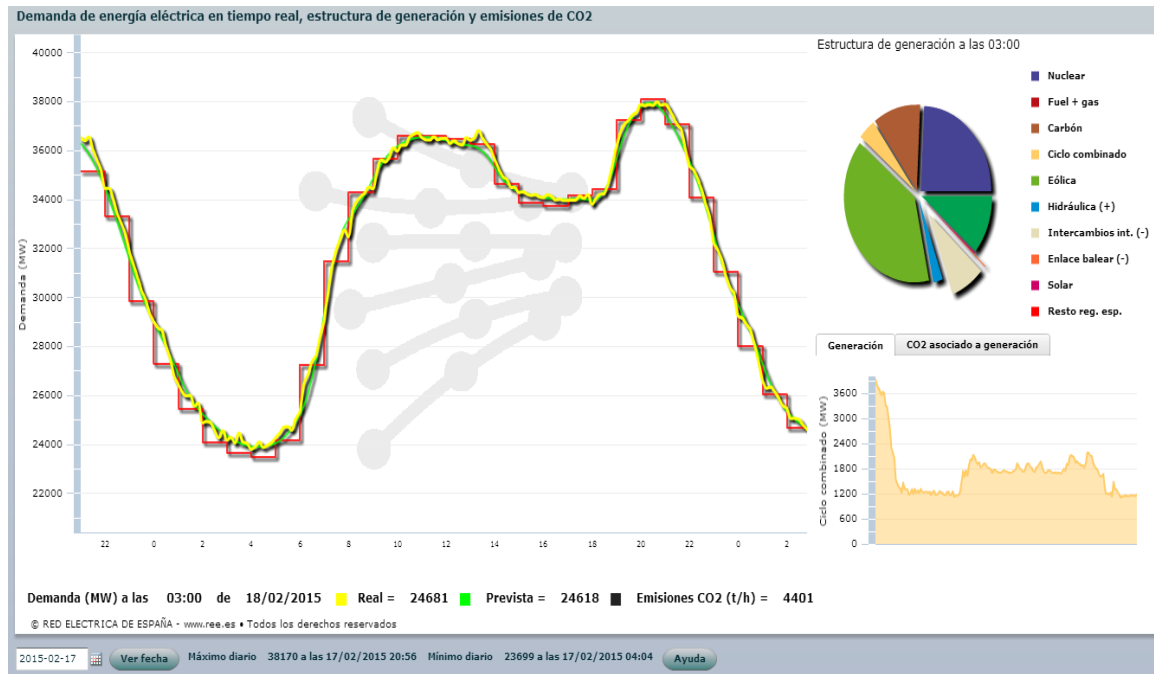


Imagen 46. Curva de demanda horaria para un día de entre semana. Red Eléctrica de España (REE) [75].

Con todo esto puede comprobarse la complejidad asociada al funcionamiento de la generación y el transporte, complejidad que se extiende también a las actividades de distribución. El sistema de distribución eléctrica en España lo conforma más de 700.000 kilómetros de líneas a las que se le suman más de 300.000 transformadores y demás sistemas eléctricos complementarios. Como ya se ha apuntado, la red de distribución opera en tres niveles de tensión, dependiendo a qué tipo de consumidor se esté suministrando. El primer nivel comprende tensiones entre 132 y 45kV, consideradas de AT; el segundo, entre 36 y 6,6kV lo cual se denomina media tensión (MT) y el tercero, opera en baja tensión (BT) en valores de 400V en trifásica y 230V en monofásica.

La actividad de distribución está regulada en los artículos 36 a 42 del Real Decreto 1955/2000 [76]. Los distribuidores son los gestores de las redes de distribución que operen y, como tal, los responsables de la explotación, mantenimiento y desarrollo de las mismas. Además han de garantizar la capacidad de la red de asumir, a largo plazo, una demanda razonable de distribución de electricidad. A cambio de estos servicios, tales empresas distribuidoras aplican

una retribución a los consumidores de la electricidad que ellos facilitan. Dicha retribución se encuentra actualmente regulada por norma según el Real Decreto 222/2008, de 15 de febrero [77], mediante el cual se persigue el objetivo de incentivar la mejora de la eficiencia de la gestión, eficiencia económica y técnica y la calidad del suministro eléctrico [74]. Pero la búsqueda de este objetivo hace del todo necesaria la relación entre electricidad y sociedad, evolucionando hacia un papel más activo por parte de los consumidores. De ahí la importancia de tener en cuenta, por parte del sector, a los consumidores finales. Esto requiere un cierto grado de adaptación de las actuales instalaciones pasando, por poner un ejemplo, por la colocación de contadores inteligentes así como facilitar a los consumidores un mayor conocimiento acerca de hábitos de consumo y buenas prácticas para consumo eficiente y el conocimiento de los periodos críticos de demanda y los precios de la electricidad a distintas horas. Los citados contadores habrán de permitir una medida en los dos sentidos, ya que los usuarios pueden actuar como consumidores o como pequeños productores, mediante instalaciones particulares de microgeneración (placas solares, etc) y sus VE. Así pues se habrá de cambiar los tradicionales contadores por unos electrónicos con capacidad de telegestión y que permitan la discriminación horaria.

Si bien queda mucho camino por recorrer para lograr alcanzar un grado óptimo en lo referente a eficiencia energética, es ya una realidad que tanto gobiernos como operadores del sistema, transportistas, distribuidores, consumidores y demás actores del sector eléctrico están aplicando medidas y trabajando en este sentido.

2. ESTADO DEL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL

En base al avance del informe sobre el sistema eléctrico español que elabora REE anualmente [78], con fecha de redacción el 23 de diciembre de 2014, la demanda de energía eléctrica peninsular al término de 2014 ascendía a 243.486 GWh, lo que supone un descenso del 1,2% respecto de los datos análogos de 2013, año en el cual la demanda cayó a niveles del año 2005. Este descenso continuado está en consonancia con el negativo comportamiento de la economía española, a partir de la crisis económica iniciada en 2008. Aún con esto, el descenso sufrido por la demanda en 2014 respecto a 2013 es inferior al sufrido en 2013 respecto al año 2012, cifrado en un 2,3%. En la Tabla 30 aparece reflejados los valores de demanda anual en Gigavatios-hora

[GWh] así como la evolución de la misma en porcentaje y dicha evolución con valores corregidos usando factores de laboralidad y temperatura, desde el año 2010 hasta 2014, quedando patente la caída en la demanda de manera continuada desde 2011.

AÑO	GWh	Δ Anual (%)	Δ Anual corregido (*) (%)
2010	260.530	3,1	2,7
2011	255.631	-1,9	-1,0
2012	252.083	-1,4	-1,8
2013	246.372	-2,3	-2,2
2014	243.486	-1,2	-0,2

Tabla 30. Evolución de la demanda eléctrica entre los años 2010 y 2014. Datos aportados por Red Eléctrica de España (REE) [75]. (*)Por los efectos de la laboralidad y la temperatura.

La cobertura de dicha demanda de energía eléctrica en 2014 se llevó a cabo de la siguiente manera: el 21,9% de la misma fue cubierta por la nuclear (21,2% en 2013), la eólica cubrió el 20,4% (inferior a la cobertura de 2013 de un 21,2%), el 16,4% lo cubrió el carbón (en 2013 fue un 14,6%), el 15,4% la hidráulica (un 14,2% en 2013) y el 10,4% la cogeneración (un 12,5% en 2013). Con una participación inferior al 10% se situaron los ciclos combinados, un 8,5% de la demanda total y un punto menos que el año anterior, y las tecnologías solares y la térmica renovable, que en conjunto cubrieron el 7% de la demanda. En la Imagen 47 puede observarse la cobertura de la demanda anual aquí detallada.

Cobertura de la demanda anual de energía eléctrica en 2014

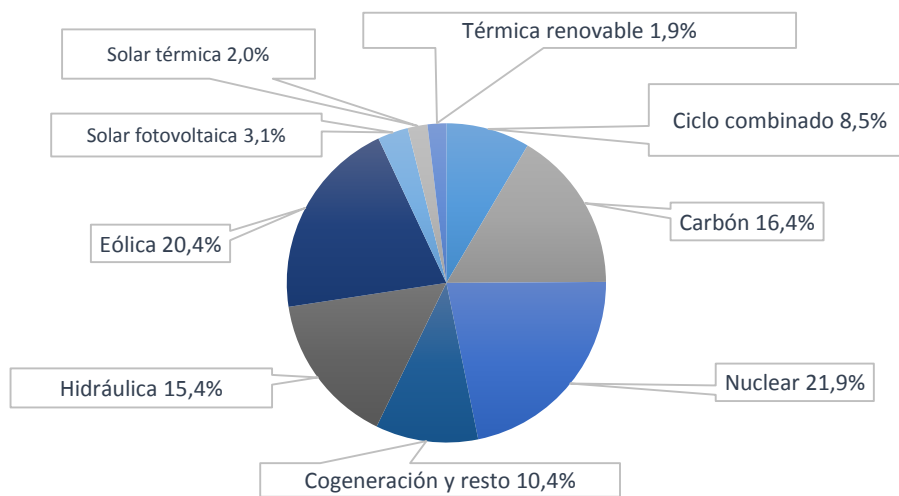


Imagen 47. Cobertura de la demanda anual de energía eléctrica en el año 2014.

El máximo de potencia instantánea²² se cifró en 38.948 MW el miércoles 4 de febrero a las 20:18 horas. Este valor se sitúa en un 3,3% inferior al máximo de 2013 y un 14,3% inferior al récord alcanzado el 17 de diciembre de 2007 de 45.450 MW, día en el que se produjo también la demanda máxima horaria, como puede apreciarse en la Imagen 48.

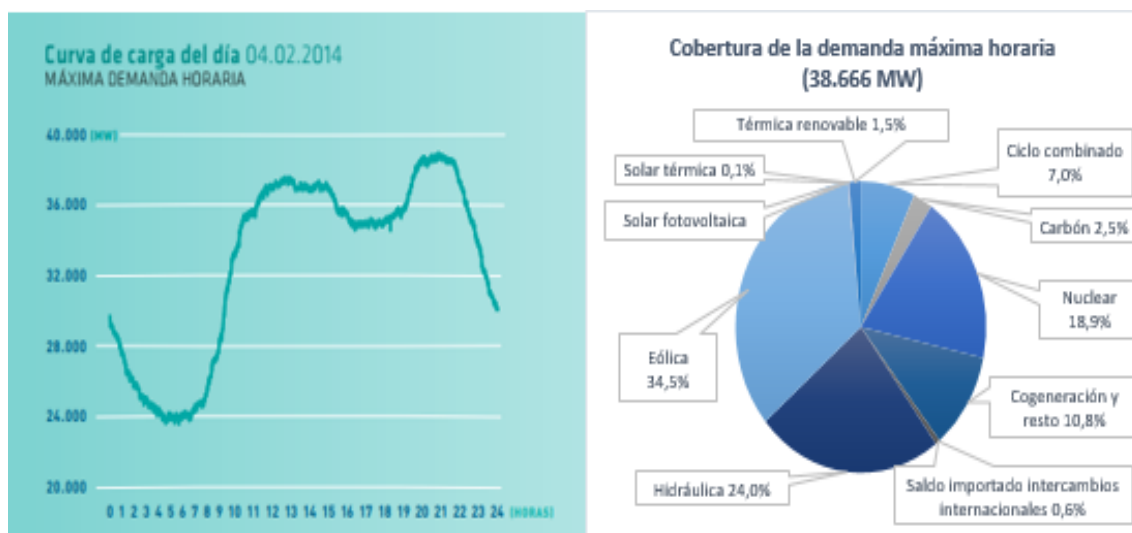


Imagen 48. Curva de carga del día 04 de febrero de 2014, en el cual se registró un record de demanda máxima horaria (izquierda) y la cobertura de la citada demanda máxima horaria, de 38.666MW (derecha). Datos aportados por Red Eléctrica de España (REE) [75].

²² Se entiende por potencia instantánea a la potencia absorbida por la demanda en cualquier instante de tiempo.

Prácticamente estable en comparación con los valores de 2013 se ha mantenido la potencia instalada²³ a nivel peninsular, finalizando 2014 con 102.259 MW lo que supone tan solo un 0,1% menos que el año anterior. Por su parte, el producible hidráulico²⁴ ascendió a los 32.655 GWh, valor muy similar al de 2013 y que equivale a un 18% más que el valor medio histórico. Cabe destacar que la generación hidráulica en 2013 protagonizó un ascenso del 74,6% respecto de 2012 [78]. Por su parte, las reservas hidráulicas finalizaron 2014 con un nivel de llenado cercano al 63% de su capacidad total frente al 58% del año 2013 y frente al 38,2% de las reservas existentes al final de 2012.

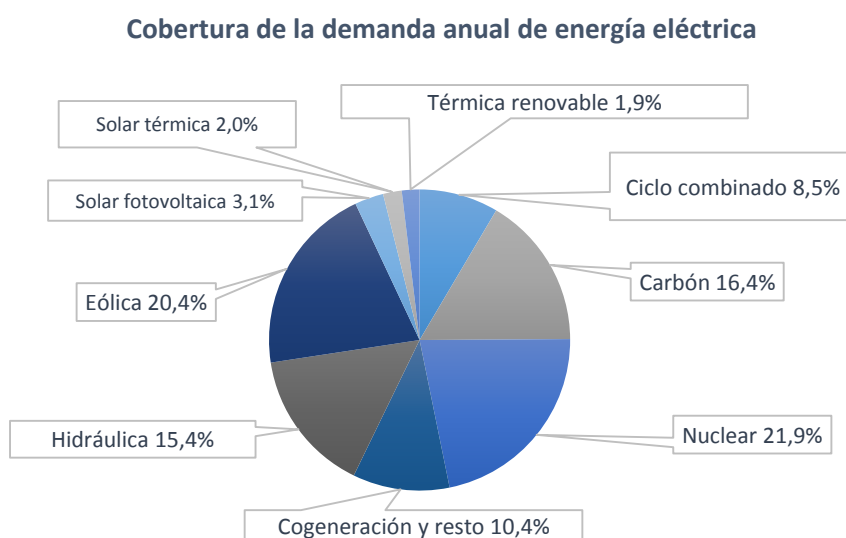


Imagen 49. Cobertura de la demanda de energía eléctrica anual.

A lo largo del año 2014, las energías renovables han mantenido un papel destacado en la producción global de energía eléctrica mundial. En el caso concreto de España, estas han cubierto el 42,8% de la producción total, aunque acusando un descenso del 1,0% en términos absolutos debido fundamentalmente al descenso del 6,1% acusado por la producción eólica. A pesar de este descenso, cabe destacar que el día 25 de marzo de 2014 se alcanzó un máximo histórico de energía diaria de generación eólica, con un valor de 352.087 MWh.

²³ Se entiende por potencia instalada a la potencia máxima que puede alcanzar una unidad de producción, durante un periodo de tiempo determinado, medida a la salida de los bornes del alternador.

²⁴ El producible hidráulico es la cantidad máxima de energía eléctrica que teóricamente se podría producir considerando las aportaciones hidráulicas registradas durante un determinado periodo de tiempo y una vez deducidas las detracciones de agua realizada para riego y otros usos distintos de la producción de energía eléctrica.

INFRAESTRUCTURAS

Según datos de REE, como TSO, la infraestructura de transporte en España durante 2014 ha puesto en servicio 621 kilómetros de circuitos, situando en un total de 42.760 kilómetros de circuitos la red nacional de transporte. Además, ya en 2013 el desarrollo de las infraestructuras de transporte de energía eléctrica experimentó un nuevo impulso, al entrar en servicio una serie de instalación con el objetivo de reforzar la fiabilidad y el grado de mallado de la red, todo ello a fin de permitir la incorporación de la nueva potencia renovable. Por su parte, la capacidad de transformación vivió en 2014 un aumento de 3.535 MVA, colocando en 84.779 MVA la capacidad de transformación total a nivel nacional. Entre los proyectos destacados en este campo se tiene la línea de 400kV Brovales-Guillena, de 237 kilómetros y con objetivo principal el garantizar la calidad de suministro en la comunidades de Extremadura y Andalucía, concluido en 2014 [78].

	2010	2011	2012	2013	2014
Circuito 400kV (km)	18.792	19.671	20.109	20.639	21.094
Circuito ≤200kV (km)	17.401	18.001	18.370	18.667	18.832
Capacidad de transformación (MVA)	66.596	68.996	74.596	76.871	79.871

Tabla 31. Evolución del sistema de transporte y transformación. Datos aportados por Red Eléctrica de España (REE) [75].

Si bien queda claro que se han llevado a cabo numerosas modificaciones tecnológicas en el Sector Eléctrico, estas han estado ligadas en su mayoría a la operabilidad del sistema, a las infraestructuras de las redes de transporte y, fundamentalmente, al marco normativo, dejando de lado las infraestructuras de distribución y, en especial, a los consumidores finales. Pero en un contexto de creciente integración de las ER al sistema eléctrico, con las peculiaridades que estas llevan asociadas en cuanto a disponibilidad y planificación, la aparición de nuevos agentes y cargas agregadas del lado de la demanda y la futura participación de los usuarios finales domésticos en todo el mercado, tanto como consumidores como productores, parece indudable la necesidad de transformación del sistema eléctrico en su conjunto, haciéndolo muy diferente al que se tenía hace unos años, en el que el equilibrio entre oferta y demanda pasaba únicamente por una gestión muy meticulosa de la generación, otorgándola una alta capacidad de adaptación a la demanda en tiempo real.

Así pues, la fomentación de medidas de eficiencia energética, la compensación de la menor gestionabilidad de las ER y la tramitación del cambio de rol de los usuarios finales, constituyen algunos de los retos que es necesario solventar en estos años a fin de alcanzar una gestión eficiente y sostenible del conjunto del sistema eléctrico. Se puede concluir que el nuevo modelo energético implica la transformación del sistema actual en un sistema distribuido, en el cual cualquier agente que esté conectado a la red cuente con la posibilidad tanto de consumir como de aportar energía, posibilitando la creación de microgeneradores y la utilización del VE como almacenamiento distribuido, de forma tal que no exista una dependencia tan directa como ocurre con la generación energética actual. Se está encaminando pues al sector eléctrico hacia el concepto de Smart Grid²⁵, redes inteligente que permiten la disminución drástica de las pérdidas por el transporte energético, facilitan la conexión a la red de todo tipo de energía renovables, soportan las capacidades de almacenamiento energético y la conexión masiva de VE puros o híbridos, tanto para su recarga como para la inyección de energía a la red. Integran nuevas y avanzadas tecnologías de comunicación y automatización, como los contadores inteligentes, así como técnicas de generación distribuida. Para lograr esta mayor eficiencia del sistema también es importante el desarrollo e implementación nuevas técnicas de gestión de la demanda [79]. En definitiva, una red que englobe las siguientes características [75]:

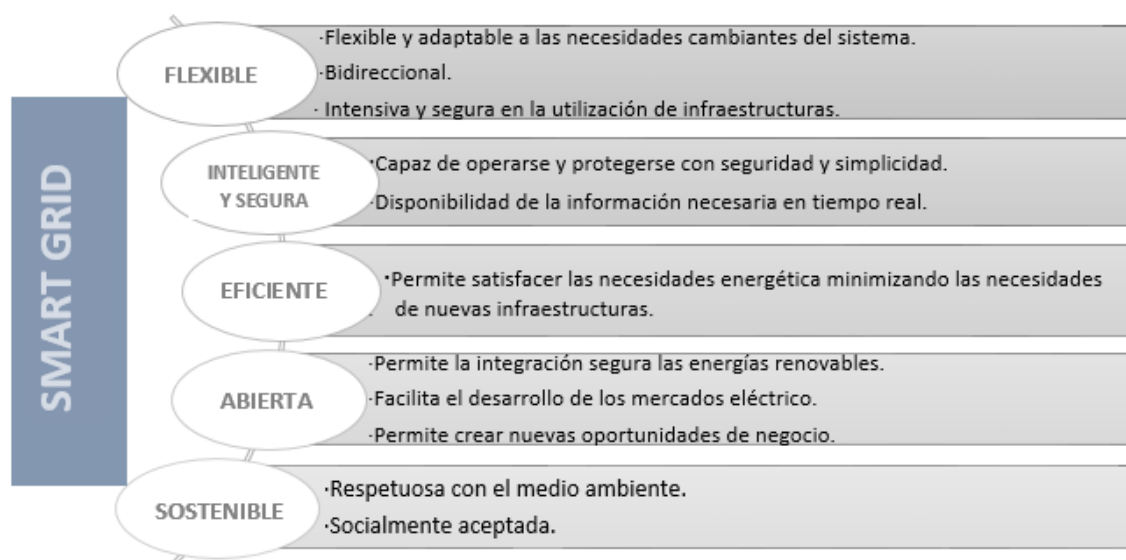


Imagen 50. Características que engloba una Smart Grid.

²⁵ El concepto de Smart Grid fue desarrollado en 2006 por "European Technology Platform for Smart Grids" y hace referencia a una red de transporte y distribución de energía eléctrica capaz de entender, asimilar, elaborar información y utilizarla adecuadamente, un sistema bidireccional entre el consumidor final y las compañías eléctricas. Además facilitan la incorporación de las ER y la integración del VE. ["Smart Grids y la evolución de la Red Eléctrica", Observatorio Industrial del Sector de la Electrónica, Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones.]

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer este trabajo a todas las personas que lo han hecho posible con su asesoramiento y consejo, con su apoyo, comprensión y confianza. Con esto considero que pongo fin a un ciclo de mi vida y quiero dar las gracias a todos los que me habéis acompañado a lo largo de esta experiencia, porque me habéis hecho ser lo que soy y lo que quiero ser.

En especial, se lo dedico a tres personas. En primer lugar a la que ha sido, es y será la persona más incondicional de mi vida. Por su confianza, cariño, dedicación y apoyo absolutos y plenamente altruistas. Por estar siempre ahí, aunque sea en la distancia, te quiero abuela. En segundo lugar, a vosotros dos, por todo lo que reflejáis para mí, lo que me habéis transmitido y lo que me gustaría aún aprender de vosotros.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Nuestro futuro común. Available on: <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agreed.htm>.
- [2] IEA. International Energy Agent. Topics: Climate Change. Available on: <http://www.iea.org/topics/climatechange/>.
- [3] Sociedad de Técnicos de la Automoción STA. El Vehículo Eléctrico. Desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio. Libbooks, 2011.
- [4] European Commission website. Energy Roadmap 2050. Available on: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf
- [5] ROMERO, Manuel; PALMA, Jesús. y David Pedro Serrano. Nuevas tecnologías para la descarbonización del transporte. Instituto IMDEA Energía.
- [6] LOPES, J.; ALMEIDA, PM Rocha; SOARES, F. J. Using vehicle-to-grid to maximize the integration of intermittent renewable energy resources in islanded electric grids. En Clean Electrical Power, 2009 International Conference on. IEEE, 2009. p. 290-295.
- [7] Tesla Motors. Premium Electric Vehicles. Available on: www.teslamotors.com.
- [8] Elektromotive. Available on: www.elektromotive.com.
- [9] Mobile energy resources in grids of electricity – merge. Available on: <http://www.ev-merge.eu/>.
- [10] Grids for vehicles – g4v. Available on: <http://www.g4v.eu/>.
- [11] Iberdrola Distribución Eléctrica. Available on: <http://www.iberdroladistribucionelectrica.com>
- [12] Sistema Ultra-rápido de Recarga mediante la Transferencia Inteligente de C.C. por contacto Directo y Sistema Operacional de almacenamientos energético de Respaldo – SURTIDOR. Available on: <http://www.ghinduction.com/proyecto-surtidor/?lang=es>.
- [13] Proyecto Verde. Available on: <http://cenitverde.es/proyecto>.
- [14] Proyecto de Movilidad Eléctrica. IDEA Movele. Available on: <http://www.movele.es/>.
- [15] Ley 49/1960, de 21 de julio, sobre propiedad horizontal. BOE-A-1960-10906.
- [16] Real Decreto 648/2011, de 9 de mayo, por el que se regula la concesión directa de subvenciones para la adquisición de vehículos eléctricos durante 2011, en el marco del Plan de acción 2010-2012 del Plan integral de impulso al vehículo eléctrico en España 2010-2014.
- [17] Real Decreto 647/2011, Real Decreto 647/2011, de 9 de mayo, por el que se regula la actividad de gestor de cargas del sistema para la realización de servicios de recarga energética.

- [18] ZHAO, Hai-xiang; MAGOULÈS, Frédéric. A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, no 6, p. 3586-3592.
- [19] HEYDT, Gerald T. The impact of electric vehicle deployment on load management strategies. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 1983, no 5, p. 1253-1259.
- [20] COLLINS, Michael M.; MADER, Gerald H. The timing of EV recharging and its effect on utilities. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 1983, vol. 32, no 1, p. 90-97.
- [21] HEIDER, Andreas; HAUBRICH, H.-J. Impact of wide-scale EV charging on the power supply network. 1998.
- [22] Endesa. El Vehículo Eléctrico. Available on: <http://www.endesavehiculoelectrico.com/vehiculo-electrico/el-vehiculo/historia>.
- [23] CLEMENT-NYNS, Kristien; HAESSEN, Edwin; DRIESEN, Johan. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2010, vol. 25, no 1, p. 371-380.
- [24] HUANG, Sikai; INFELD, David. The impact of domestic Plug-in Hybrid Electric Vehicles on power distribution system loads. En *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*. IEEE, 2010. p. 1-7.
- [25] GAO, Shuang, et al. Modeling and coordinated control for integrating electric vehicles into the power grid. En *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on*. IEEE, 2011. p. 1-6.
- [26] TURKER, Harun; BACHA, Seddik; CHATROUX, Daniel. Impact of plug-in hybrid electric vehicles (phevs) on the french electric grid. En *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES. IEEE, 2010*. p. 1-8.
- [27] POCH, Leslie, et al. Impacts of plug-in hybrid electric vehicles on the electric power system in the western United States. En *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. IEEE, 2010*. p. 1-7.
- [28] KIVILUOMA, Juha; MEIBOM, Peter. Methodology for modelling plug-in electric vehicles in the power system and cost estimates for a system with either smart or dumb electric vehicles. *Energy*, 2011, vol. 36, no 3, p. 1758-1767.
- [29] KEMPTON, Willett, et al. A test of vehicle-to-grid (V2G) for energy storage and frequency regulation in the PJM system. Results from an Industry-University Research Partnership, 2008, vol. 32.
- [30] CHAU, K. T.; CHAN, C. C.; CHAU, K. T. *Modern electric vehicle technology*. Oxford science publications, 2001.
- [31] DUVALL, Mark, et al. *Advanced batteries for electric-drive vehicles*. Electric Power Research Institute (EPRI), 2004.
- [32] BURKE, Andrew F. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 2007, vol. 95, no 4, p. 806-820.
- [33] CHAN, C. C. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 2007, vol. 95, no 4, p. 704-718.

- [34] IEA. International Energy Agent. Technology Roadmap. Electric and Plug-in hybrid electric vehicles, june 2011. Available on: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EV_PHEV_Roadmap.pdf.
- [35] Chademo Association. Available on: <http://www.chadem.com>.
- [36] YILMAZ, Murat; KREIN, Philip T. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2013, vol. 28, no 5, p. 2151-2169.
- [37] YILMAZ, Murat; KREIN, Philip T. Review of charging power levels and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. En Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International. IEEE, 2012. p. 1-8.
- [38] ADAN, Ivo; RESING, Jacques. Queueing theory. 2002. Available on: <http://www.win.tue.nl/~iadan/queueing.pdf>, Department of Mathematics and Computing Science, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 2002.
- [39] GARCIA-VALLE, Rodrigo; VLACHOGIANNIS, John G. Letter to the editor: electric vehicle demand model for load flow studies. 2009.
- [40] Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid. Movilidad urbana sostenibles, un reto energético y ambiental, 2010. Available on: <http://www.fenercom.com/pages/publicaciones/publicacion.php?id=135>.
- [41] OMM. Observatorio de la Movilidad Metropolitana. El transporte urbano y metropolitano en España, junio 2013. Available on: <http://www.observatoriomovilidad.es/>.
- [42] EMQ. Enquesta de Mobilitat Quotidiana. Available on: <http://www.iernb.uab.es/htm/mobilitat/cat/emq.asp>.
- [43] ATM. Autoritat del Transport Metropolità. Available on: <http://www.atm.cat/web/indexesp.php>.
- [44] GIULIANO, Genevieve; GILLESPIE, Andrew. Research issues regarding societal change and transport. Journal of transport geography, 1997, vol. 5, no 3, p. 165-176.
- [45] Motorpasión Futuro. Hablemos de eficiencia: coche de combustión vs coche eléctrico. Available on: <http://www.motorpasionfuturo.com/coches-electricos/hablemos-de-eficiencia-coche-de-combustion-vs-coche-electrico>.
- [46] KAMPMAN, Bettina; LEGUIJT, Cor; BENNINK, Dorien; WIELDERS, Lonneke; RIJKEE, Xander; DE BUCK, Ab; BRAAT, Willem. Green Power for Electric Cars Development of policy recommendations to harvest the potential of electric vehicles, 2010.
- [47] KRARTI, Moncef. An overview of artificial intelligence-based methods for building energy systems. Journal of Solar Energy Engineering, 2003, vol. 125, no 3, p. 331-342.
- [48] DOUNIS, Anastasios I. Artificial intelligence for energy conservation in buildings. Advances in Building Energy Research, 2010, vol. 4, no 1, p. 267-299.
- [49] ZHAO, Hai-xiang; MAGOULÈS, Frédéric. A review on the prediction of building energy consumption. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, vol. 16, no 6, p. 3586-3592.

- [50] YAO, Runming; STEEMERS, Koen. A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. *Energy and Buildings*, 2005, vol. 37, no 6, p. 663-671.
- [51] WANG, Shengwei; XU, Xinhua. Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification. *International Journal of Thermal Sciences*, 2006, vol. 45, no 4, p. 419-432.
- [52] KARATASOU, S.; SANTAMOURIS, M.; GEROS, V. Modeling and predicting building's energy use with artificial neural networks: Methods and results. *Energy and Buildings*, 2006, vol. 38, no 8, p. 949-958.
- [53] LIANG, Jian; DU, Ruxu. Model-based fault detection and diagnosis of HVAC systems using support vector machine method. *International Journal of refrigeration*, 2007, vol. 30, no 6, p. 1104-1114.
- [54] JIMÉNEZ, M. J.; HERAS, M. R. Application of multi-output ARX models for estimation of the U and g values of building components in outdoor testing. *Solar Energy*, 2005, vol. 79, no 3, p. 302-310.
- [55] KIMBARA, Akiomi, et al. On-line prediction for load profile of an air-conditioning system. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA (United States), 1995.
- [56] HOFFMAN, A. J. Peak demand control in commercial buildings with target peak adjustment based on load forecasting. En *Control Applications*, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on. IEEE, 1998. p. 1292-1296.
- [57] NEWSHAM, Guy R.; BIRT, Benjamin J. Building-level occupancy data to improve ARIMA-based electricity use forecasts. En *Proceedings of the 2nd ACM workshop on embedded sensing systems for energy-efficiency in building*. ACM, 2010. p. 13-18.
- [58] AZADEH, AGHADERI; GHADERI, S. F.; SOHRABKHANI, S. Annual electricity consumption forecasting by neural network in high energy consuming industrial sectors. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, no 8, p. 2272-2278.
- [59] IZQUIERDO, Luis R., et al. Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *Empiria. Revista de metodología de ciencias sociales*, 2008, no 16, p. 85-112.
- [60] VLPGO. Very Large Power Grid Operations. Available on: www.vlpgo.org.
- [61] REE. Red Eléctrica de España. Respuesta de los TSO al Vehículo Eléctrico. Available on: www.ree.es/es/red21/vehiculo-electrico.
- [62] SANDELS, Claes, et al. Vehicle to grid—Monte Carlo simulations for optimal aggregator strategies. En *Power System Technology (POWERCON)*, 2010 International Conference on. IEEE, 2010. p. 1-8.
- [63] YILMAZ, Murat; KREIN, Philip T. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 2013, vol. 28, no 5, p. 2151-2169.
- [64] TOMIĆ, Jasna; KEMPTON, Willett. Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. *Journal of Power Sources*, 2007, vol. 168, no 2, p. 459-468.

- [65] PETERSON, Scott B.; WHITACRE, J. F.; APT, Jay. The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage. *Journal of Power Sources*, 2010, vol. 195, no 8, p. 2377-2384.
- [66] BROOKS, Alec; THESEN, SVEN H. PG&E and Tesla Motors: Vehicle to grid demonstration and evaluation program. En *Proc. 23rd Elect. Veh. Symp.* 2007. p. 1-10.
- [67] OLIVELLA ROSELL, Pol, et al. Modelado de la demanda de carga lenta y rápida de vehículos eléctricos para el estudio de impacto en la red de distribución. 2012.
- [68] ANDERSON, Marie Karen. Characteristics of trips and travellers in private and public transportation in the Danish travel survey data. *Trafikdage 2010*, 2010.
- [69] CETELEM. El coche eléctrico y los europeos, 2012. Available on: <http://www.elobservatoriocetelem.es/author/admin/page/63/>.
- [70] MATLAB. MathWorks. Available on: <http://es.mathworks.com/help/matlab/math/multidimensional-arrays.html>.
- [71] Real Decreto 216/2014, de 28 de marzo, por el que se establece la metodología de cálculo de los precios voluntarios para el pequeño consumidor de energía eléctrica y su régimen jurídico de contratación.
- [72] RANA, Salim. Battery Management System. U.S. Patent Application 13/348,455, 11 Ene. 2012.
- [73] UNESA. Asociación Española de la Industria Eléctrica. Available on: www.unesa.es
- [74] MINETUR. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Energía Eléctrica. Available on: <http://www.minetur.gob.es/energia/electricidad/Paginas/Index.aspx>
- [75] REE. Red Eléctrica de España. Available on: <http://www.ree.es/es/>.
- [76] Real Decreto 1955/200, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización. Artículos de 36 a 42.
- [77] Real Decreto 222/2008, de 15 de febrero, por el que se establece el régimen retributivo de la actividad de distribución de energía eléctrica.
- [78] REE. Red Eléctrica de España. Informe sobre el sistema eléctrico, 2014. Available on: http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance_informe_sistema_electrico_2014.pdf.
- [79] VENKATESAN, Naveen; SOLANKI, Jignesh; SOLANKI, Sarika Khushalani. Residential Demand Response model and impact on voltage profile and losses of an electric distribution network. *Applied energy*, 2012, vol. 96, p. 84-91.
- [80] Smart City Expo World Congress. Available on: <http://www.smartcityexpo.com/>